



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta textilní



# VLIV INTENZITY OSVĚTLENÍ NA ROZLIŠOVÁNÍ MALÝCH BAREVNÝCH ROZDÍLŮ

Diplomová práce

Studijní program: N3957 – Průmyslové inženýrství  
Studijní obor: 3901T073 – Produktové inženýrství

Autor práce: **Marcela Pechová**  
Vedoucí práce: doc. Ing. Michal Vík, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC  
Faculty of Textile Engineering



# INFLUENCE OF LUMINANCE LEVELS ON THE DISCRIMINATION SMALL COLOR DIFFERENCES

Diploma thesis

Study programme: N3957 – Industrial Engineering  
Study branch: 3901T073 – Product Engineering

Author: **Marcela Pechová**  
Supervisor: doc. Ing. Michal Vík, Ph.D.



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marcela Pechová**  
Osobní číslo: **T12000465**  
Studijní program: **N3957 Průmyslové inženýrství**  
Studijní obor: **Produktové inženýrství**  
Název tématu: **Vliv intenzity osvětlení na rozlišování malých barevných rozdílů**  
Zadávající katedra: **Katedra hodnocení textilií**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zpracujte přehled dosavadních poznatků v oblasti měření barevnosti a vzhledu se zaměřením na výpočty barevných odchylek.
2. Proveďte studii vizuálního hodnocení barevných rozdílů pomocí sady barevných standardů při různých intenzitách osvětlení.
3. Vyhodnoťte výsledky vizuálního hodnocení barevných diferencí s ohledem na validitu dV při fotopické, mezopické a skotopické úrovni osvětlení.
4. Porovnejte výsledky predikční schopnosti rovnic CIELAB, CMC(l:c), CIE2000 pro výpočty barevných odchylek.
5. Vypracujte studii dalšího postupu.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 50 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Vik, M.: Základy měření barevnosti, I. díl, Skriptum TU Liberec 1995
2. Křehni, R.: Color Spaces and Its Divisions, John Wiley and Sons, Hoboken 2003
3. Richter, K.: Computergrafik und Farbmeterik, VDE-Verlag, Berlin 1996
4. Časopisy: Col. Res. Appl., Die Farbe, Tex. Chem. Col., J. Soc. D. Col., atd.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Michal Vik, Ph.D.

Katedra materiálového inženýrství


Konzultant diplomové práce:

Ing. Martina Viková, Ph.D.


Katedra materiálového inženýrství

Datum zadání diplomové práce: 20. ledna 2014

Termín odevzdání diplomové práce: 8. ledna 2015

  
Ing. Jana Drašarová, Ph.D.  
děkanka



  
doc. Ing. Vladimír Bajžík, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 12. prosince 2014

## Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí vloženou do IS STAG.

V Liberci dne 8. ledna 2015

.....  
podpis

## **Poděkování**

Velmi ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Michalu Vikovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky, odborné vedení, ochotu, vstřícnost a věnovaný čas, který mi v průběhu psaní diplomové práce poskytl. Rovněž děkuji konzultantovi diplomové práce Ing. Martině Vikové, Ph.D. za odborné rady a připomínky.

V neposlední řadě děkuji rodičům za materiální a morální podporu během celého studia.

V Liberci dne 8. ledna 2015

.....  
Marcela Pechová

## Anotace

Diplomová práce se zabývá vlivem intenzity osvětlení na rozlišování malých barevných rozdílů. V úvodní části je zpracován přehled poznatků z oblasti anatomie a fyziologie zraku, poruch barevného vidění, adaptační mechanismy s ohledem na intenzitu osvětlení a barevnými modely. Experimentální část je zaměřena na subjektivní hodnocení sady barevných vzorků, testování barvocitu a objektivní měření a vyhodnocení sady barevných vzorků. Výsledkem subjektivního hodnocení je závislost vnímání malých barevných rozdílů na intenzitě osvětlení. Barevné vzorky byly objektivně změřeny remisním spektrofotometrem a pomocí charakteristiky STRESS byla vyjádřena predikční schopnost rovnic pro výpočet barevných rozdílů CIELAB, CMC(1:c) a CIEDE2000.

**Klíčová slova** – malé barevné rozdíly, Purkyňův jev, vizuálně vnímaná barevná odchylka, STRESS, intenzita osvětlení, Farnsworth-Munsellův 100 Hue test

## Annotation

Diploma thesis deals with the study of influence of luminance levels on the discrimination small color differences. In the first part of this work contains an overview of knowledge of anatomy and physiology of vision, color blindness, adaptation mechanisms with respect to luminance levels and color models. The experimental part of this work is focused on the subjective evaluation of a set of color samples, testing of color vision deficiency and objective measurement and evaluation of a set of color samples. The result is a subjective evaluation of the dependence of discrimination of small color differences on luminance levels. Color samples were objectively measured with the remission spectrophotometer and using the characteristics STRESS were expressed the predictive ability of equations for the calculation the color differences CIELAB, CMC(1: c) and CIEDE2000.

**Keywords** – small color differences, Purkinje shift, visually perceived color difference, luminance levels, STRESS

# Obsah

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>2. FYZIOLOGIE ZRAKOVÉHO ÚSTROJÍ A ZPRACOVÁNÍ ZRAKOVÉHO PODNĚTU .....</b>	<b>12</b>
2.1. ZRAKOVÉ ÚSTROJÍ.....	12
2.1.1. <i>Bulbus oculi</i> .....	12
2.1.2. <i>Tunica nervosa</i> .....	13
2.1.2.1. Pars caeca retinae .....	13
2.1.2.2. Pars optica retinae .....	13
2.2. SÍTNICE .....	13
2.3. FOTORECEPTORY.....	14
2.3.1. <i>Tyčinky</i> .....	14
2.3.2. <i>Čípky</i> .....	15
2.4. HUSTOTA FOTORECEPTORŮ .....	16
2.5. FOTOCHÉMIE ZRAKOVÝCH PIGMENTŮ .....	17
2.5.1. <i>Iodopsin</i> .....	17
2.5.2. <i>Rhodopsin</i> .....	18
2.6. ŽLUTÁ SKVRNA .....	18
2.7. ZRAKOVÝ NERV .....	19
2.8. ZRAKOVÁ DRÁHA.....	19
2.9. ZRAKOVÁ KOROVÁ CENTRA .....	21
<b>3. PORUCHY BAREVNÉHO VIDĚNÍ, JEJICH PŘÍČINY A JEJICH TESTOVÁNÍ.....</b>	<b>22</b>
3.1. PORUCHY BAREVNÉHO VIDĚNÍ A JEJICH PŘÍČINY .....	22
3.1.1. <i>Poruchy vrozené</i> .....	22
3.1.1.1. Monochromazie.....	22
3.1.1.2. Dichromazie .....	23
3.1.1.3. Anomální trichromazie.....	25
3.1.2. <i>Poruchy získané</i> .....	27
3.1.3. <i>Poruchy dočasně získané</i> .....	27
3.2. TESTOVÁNÍ BAREVNÉHO VIDĚNÍ .....	29
3.2.1. <i>Rozlišovací testy</i> .....	29
3.2.2. <i>Seřazovací testy</i> .....	30
3.2.3. <i>Míchací testy</i> .....	32
3.2.4. <i>Pojmenovávací testy</i> .....	32
<b>4. FOTOMETRIE A FOTOMETRICKÉ VELIČINY .....</b>	<b>33</b>
4.1. ELEKTROMAGNETICKÉ SPEKTRUM ZÁŘENÍ.....	33
4.2. KVANTOVÁ TEORIE .....	33
4.3. FOTOMETRIE .....	34
4.3.1. <i>Fotometrické a radiometrické veličiny</i> .....	34



4.4.	ADAPTAČNÍ MECHANISMY .....	35
4.4.1.	<i>Adaptace na světlo a tmu</i> .....	36
4.4.2.	<i>Vidění fotopické</i> .....	36
4.4.3.	<i>Vidění skotopické</i> .....	37
4.4.4.	<i>Vidění mezopické</i> .....	37
4.4.5.	<i>Purkyňův jev</i> .....	38
4.5.	TEORIE BAREV A BAREVNÉHO VIDĚNÍ .....	38
4.5.1.	<i>Young – Helmholtz teorie</i> .....	39
4.5.2.	<i>Oponentní teorie</i> .....	40
4.5.3.	<i>Další teorie</i> .....	41
<b>5.</b>	<b>BAREVNÉ PROSTORY A HODNOCENÍ BAREVNÝCH ROZDÍLŮ</b> .....	<b>42</b>
5.1.	BAREVNÉ PROSTORY .....	42
5.1.1.	<i>RGB model</i> .....	42
5.1.2.	<i>CIEXYZ</i> .....	43
5.1.3.	<i>CIELAB</i> .....	45
5.2.	ROVNICE PRO VÝPOČET BAREVNÝCH ODCHYLEK .....	46
5.2.1.	<i>CIELAB</i> .....	46
5.2.2.	<i>CMC (l:c)</i> .....	47
5.2.3.	<i>CIEDE2000</i> .....	48
5.2.4.	<i>Další rovnice</i> .....	50
<b>6.</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>51</b>
6.1.	OBJEKTIVNÍ MĚŘENÍ SADY BAREVNÝCH VZORKŮ .....	54
6.1.1.	<i>Úvod</i> .....	54
6.1.2.	<i>Metodika</i> .....	54
6.1.3.	<i>Postup měření</i> .....	55
6.1.4.	<i>Výsledky a diskuze</i> .....	56
6.2.	VYŠETŘOVÁNÍ BARVOCITU FARNSWORTH-MUNSELL 100 HUE TESTEM .....	58
6.2.1.	<i>Úvod</i> .....	58
6.2.2.	<i>Metodika</i> .....	58
6.2.3.	<i>Pozorovatelé</i> .....	59
6.2.4.	<i>Postup měření</i> .....	60
6.2.5.	<i>Výsledky a diskuze</i> .....	60
6.3.	SUBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ SADY BAREVNÝCH VZORKŮ .....	67
6.3.1.	<i>Úvod</i> .....	67
6.3.2.	<i>Metodika</i> .....	67
6.3.3.	<i>Postup měření</i> .....	68
6.3.4.	<i>Výsledky a diskuze</i> .....	73
<b>7.</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>89</b>
<b>8.</b>	<b>SEZNAM LITERATURY A ZDROJŮ</b> .....	<b>91</b>
<b>9.</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>99</b>
<b>10.</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>101</b>

<b>11.</b>	<b>SEZNAM ROVNIC .....</b>	<b>102</b>
<b>12.</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>104</b>
	P1.....	I
	P2.....	VIII
	P3.....	IX
	P4.....	XVI
	P5.....	XVI
	P6.....	XVI

# 1. Úvod

Zrakového ústrojí ve spojení se zrakovou dráhou a zrakovými korovými centry umožňuje vnímat okolní svět kolem nás. Toto spojení zajišťuje 80 % informací a ve spojení s dalšími smysly umožňuje samotnou existenci jedince. Neméně důležitou součástí vnímání okolního světa je barevné vidění. Zpracování světelného paprsku a následný vjem barev je však možný pouze v případě, kdy nedochází na sítnici nebo v dalších částech zpracování zrakového vjemu k žádným změnám, ať už morfologickým nebo genetickým. V lidském zrakovém ústrojí se nacházejí tři druhy čípků, z nichž každý má jinou spektrální citlivost, která dovoluje vnímat barvy v rozsahu viditelného záření.

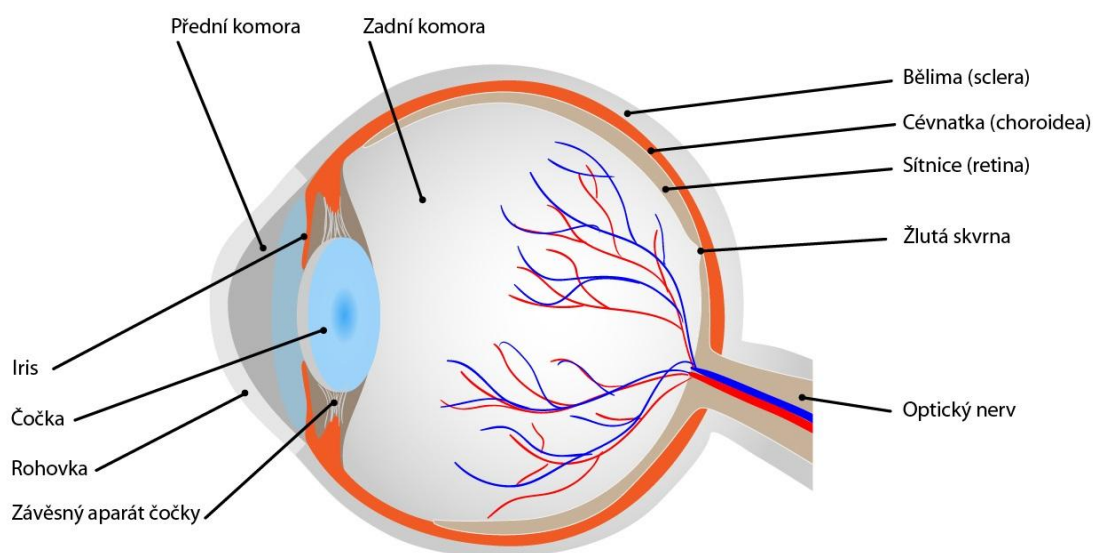
Cílem diplomové práce je zpracování rešerše uvedené problematiky v oblasti měření barevnosti a vzhledu se zaměřením na výpočty barevných odchylek, provedení studie individuálního hodnocení sady barevných vzorků skupinou pozorovatelů při různých intenzitách osvětlení, vyhodnocení výsledků vizuálního hodnocení barevných vzorků s ohledem na vizuální odchylku při fotopické, mezopické a skotopické úrovni osvětlení, porovnání výsledků predikční schopnosti rovnic CIELAB, CMC( $l:c$ ), CIE2000 pro výpočty barevných rozdílů.

Diplomová práce na téma Vliv intenzity osvětlení na rozlišování malých barevných rozdílů je tvořena teoretickou, rešeršní částí a částí experimentální. Teoretická část se zabývá lidským zrakovým ústrojím, zpracováním zrakového vjemu, poruchami barevného vidění, jejich příčinami a jejich testováním. V práci je dále popsán vývoj v oblasti barevného vnímání z hlediska fotometrie a adaptační mechanismy a rešerše problematiky mezopického vidění a Purkyněho jevu. V další části jsou popsány barevné prostory a jejich využití při hodnocení barevných rozdílů. Experimentální část je rozdělena na tři části. První část experimentu popisuje objektivní měření sady barevných vzorků, výpočet barevných rozdílů ze změřených barevných souřadnic a porovnání predikční schopnosti vybraných rovnic pro výpočet barevných rozdílů. Druhou část experimentu tvoří vyšetřování barvocitu zvolené skupiny pozorovatelů pomocí Farnsworth-Munsellova 100 Hue testu. Třetí část experimentu je věnována subjektivnímu hodnocení sady barevných vzorků pomocí šedé stupnice vybranou skupinou pozorovatelů a vyhodnocení výsledků individuálního hodnocení.

## 2. Fyziologie zrakového ústrojí a zpracování zrakového podnětu

### 2.1. Zrakové ústrojí

*Zrakové ústrojí (obrázek č. 1)* je vysoce specializovaný a komplexní orgán zajišťující rozpoznání předmětů, pohybu, světla a barev. Pomocí zrakové dráhy, jejíchž součástí jsou mimo jiné i fotoreceptory nebo zrakový nerv, dochází k postupnému přenosu podnětů až do zrakového centra v týlním laloku. Zrakové ústrojí je tvořeno dvěma společně kooperujícími částmi. *Bulbus oculi* (oční koule, oko) a *organa oculi accessoria* (akcesorní struktury oka). Tyto struktury zajišťují především ochranu, pohyblivost a výživu bulbu. Řadí se k nim *očnice*, *víčka*, *spojivka*, *slzný aparát*, *okohybné svaly*, *cévy* a *nervy*. [1–4]



Obrázek č. 1 – Zrakové ústrojí [5]

#### 2.1.1. Bulbus oculi

Oční koule je tvořena třemi vrstvami, vnější vazivovou vrstvou zvanou *tunica fibrosa* (bělima a rohovka), cévnatou střední vrstvou zvanou *tunica vasculosa* (cévnatka, řasnaté tělísko, zornice a duhovka) a vnitřní nervovou vrstvou zvanou *tunica nervosa*. [3]

### 2.1.2. Tunica nervosa

Tunica nervosa tvoří vnitřní nervovou vrstvu oka. Sama je tvořena dvěma vrstvami, *pars caeca retinae* a *pars optica retinae*. [3, 6]

#### 2.1.2.1. *Pars caeca retinae*

*Pars caeca retinae* je vrstva, která neobsahuje světločivné ani nervové buňky a vlákna, je tvořena pouze pigmentovým epitelem. Od *pars optica retinae* je oddělena obloukovitě-klikatou linií *ora serrata*. [6]

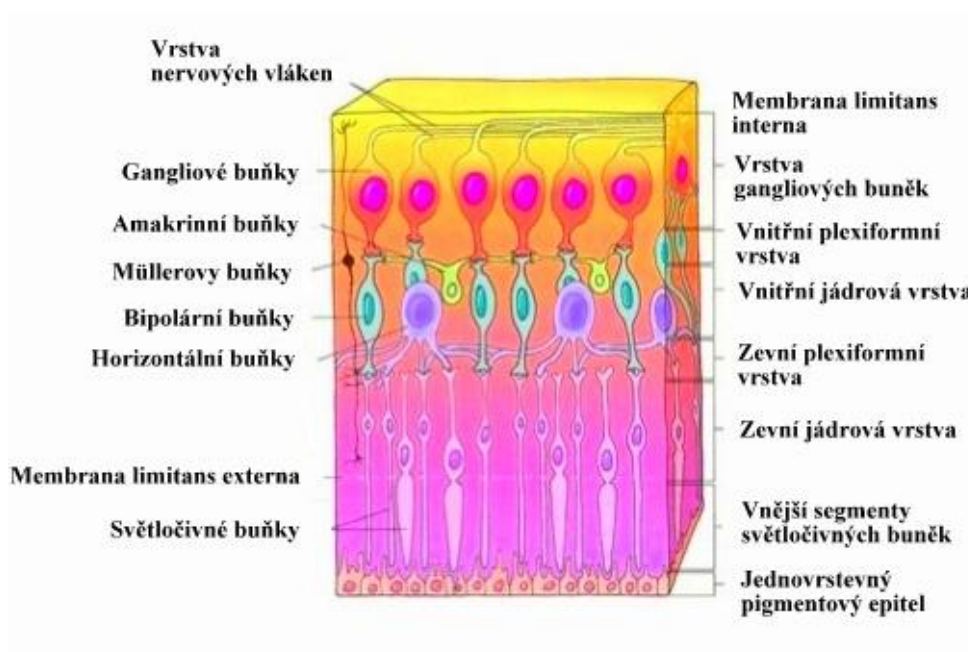
#### 2.1.2.2. *Pars optica retinae*

*Pars optica retinae* je tvořena *retinou* (sítnicí) obsahující *nervové buňky*, *nervová vlákna* a *světločivné buňky*, a *pigmentovým epitelem*. [6]

## 2.2. Sítnice

Sítnice je desetivrstevná světločivná tkáň (**obrázek č. 2**) lidského oka skládající se z *jednovrstevného pigmentového epitelu* a *neuroretiny*. Jednovrstevný pigmentový epitel tvoří hlavní zevní vrstvu sítnice a je uložen mezi cévnatkou a naléhá na neuroretinu. Neuroretina je tvořena *vrstvou světločivných buněk*, *membranou limitans externa*, *zevní jádrovou vrstvou*, *zevní plexiformní vrstvou*, *vnitřní jádrovou vrstvou*, *vnitřní plexiformní vrstvou*, *vrstvou gangliových buněk*, *vrstvou nervových vláken* a *membranou limitans interna*, která odděluje sítnici od sklivce. Všechny výše jmenované vrstvy jsou zobrazeny na **obrázku č. 2**. Vrstvy jsou na obrázku seřazeny od vnitřní vrstvy po vnější vrstvu. [1–3, 6]

Makroskopicky sítnice vypadá jako velmi jemná transparentní blána jemného růžového zabarvení.



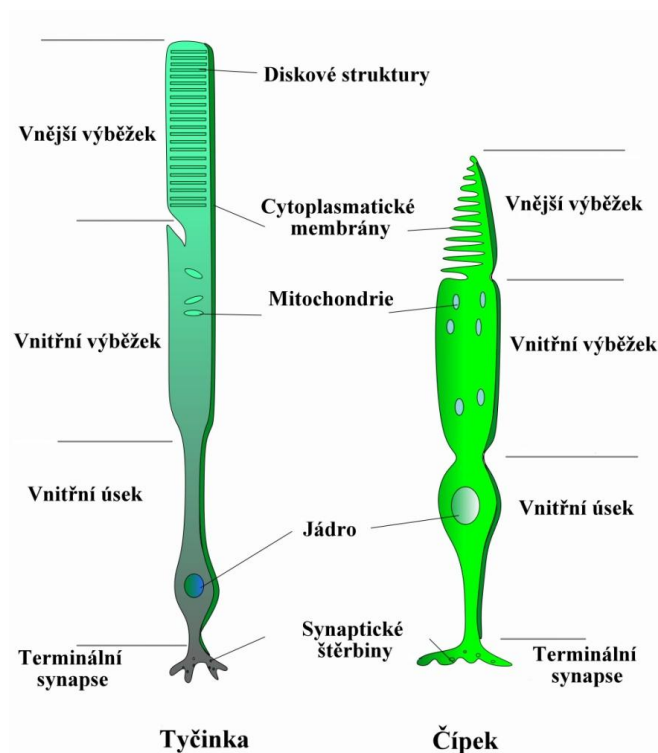
Obrázek č. 2 – Histologická stavba sítnice [7]

## 2.3. Fotoreceptory

Fotoreceptory, světločivné elementy sítnice rozlišujeme v lidském zrakovém ústrojí na dva typy jako *tyčinky* a *čípky*. Jádra tyčinek a čípků se nacházejí ve vnitřní jádrové vrstvě sítnice. Histologickou stavbu obou těchto receptorů rozlišujeme na *vnější* a *vnitřní úsek*. [6]

### 2.3.1. Tyčinky

Vnější úsek tyčinek (vlastní tyčinka) je tvořen *vnějším* a *vnitřním výběžkem*. Ve vnějším úseku se nacházejí *diskové struktury*, které obsahují 600 až 1000 membrán. V těchto strukturách se nachází světločivný pigment rhodopsin. Vnitřní výběžek tyčinek je tvořen mitochondriemi a polyribosomy. Vnitřní úsek tyčinek vyplňuje jádro, které může být různě vzdáleno od vnitřního výběžku, a četná nervová vlákna. Koncovou část tyčinek tvoří synaptické štěrby, ve kterých se tvoří synapse s bipolárními buňkami. Histologická struktura tyčinky je zobrazena na **obrázku č. 3**.



**Obrázek č. 3** – Histologická stavba tyčinky a čípku [8]

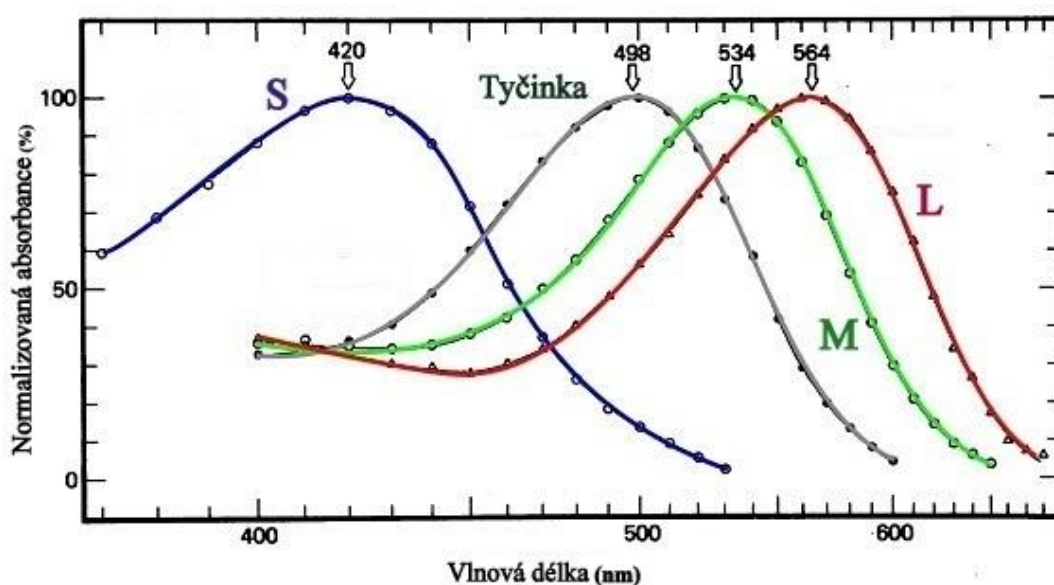
Hlavní funkcí tyčinek je vidění za snížených světelných podmínek. Tyčinky reagují více na nižší intenzitu osvětlení. V lidském oku nalezneme těchto vysoce senzitivních struktur kolem 90 až 120 milionů. Tyčinky jsou obecně nejcitlivější na zelenomodrou část spektra.

### 2.3.2. Čípky

Čípky (**obrázek č. 3**) jsou druhým typem světločivných elementů a svojí stavbou připomínají tyčinky. Od tyčinek se však odlišují svým tvarem, jsou výrazně kratší, silnější a na rozdíl od tyčinek kuželovité. Vnější úsek je tvořen vnějším výběžkem a vnitřním výběžkem. Ve vnějším výběžku se nacházejí hřebenovitě vybiňující struktury z povrchové membrány, které obsahují světločivný pigment *iodopsin*. Ve vnitřním výběžku se nacházejí mitochondrie. Ve vnitřním úseku čípku je uloženo jádro, které je na rozdíl od tyčinky větší a čípkové nervy, které jsou objemnější. Vnitřní úsek přechází do synaptických štěrbin, kde dochází k napojení na bipolární buňky. [6]

Hlavní funkcí čípků je vidění za zvýšených světelných podmínek tzn., že reagují na světlo vyšší intenzity než tyčinky. V lidském oku jich nalezneme okolo 6 milionů a na rozdíl od tyčinek existující tři typy těchto fotoreceptorů.

Čípky se liší odlišným typem iodopsinu, který reaguje na různou vlnovou délku dopadajícího záření. Prvním typem čípků je *čípek S* s pigmentem absorbujícím záření vlnové délky 420 nm, druhým typem je pak *čípek M* s pigmentem absorbujícím záření vlnové délky 534 nm a třetí *čípek L* s pigmentem absorbujícím záření vlnové délky 564 nm. Všeobecně jsou čípky nejvíce citlivé na žlutozelenou část spektra. **Obrázek č. 4** ukazuje normalizovanou absorbanci jednotlivých typů fotoreceptorů vzhledem k vlnové délce dopadajícího záření.



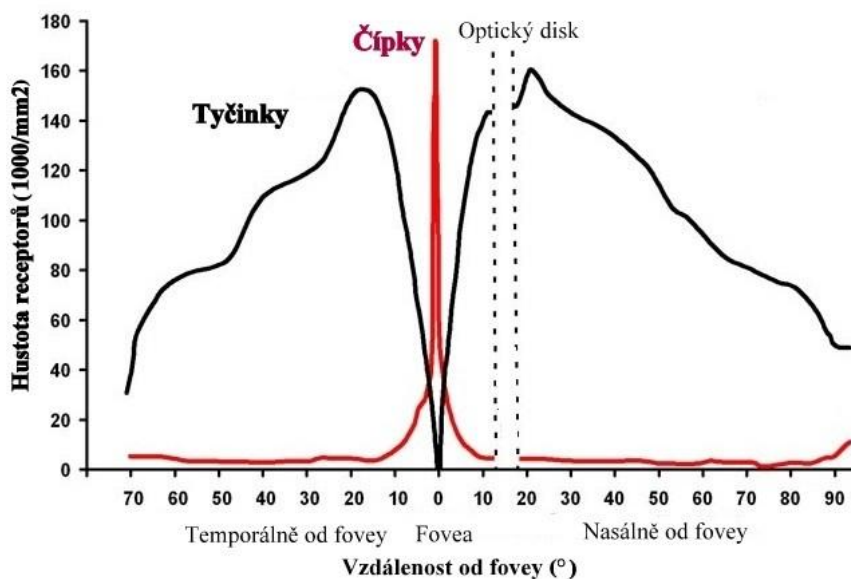
**Obrázek č. 4** – Spektrální citlivost tyčinek a čípků (normalizovaná absorbance) [9]

## 2.4. Hustota fotoreceptorů

Shevell [4] ve své knize uvádí, že hustota fotoreceptorů se mění v závislosti na poloze od centra nejostřejšího vidění. Hustota tyčinek roste směrem od centra k periférii zhruba 5 – 7 mm temporálně (18 °) a nasálně (22 °), kde dosahuje hodnot 150 000 až 160 000 tyčinek/mm<sup>2</sup>. Naopak u čípků je největší hustota v oblasti žluté skvrny (do 5°), kde dosahuje hodnoty 180 000 čípků/mm<sup>2</sup>. [6] Poměr jednotlivých typů čípků (S, M a L) na sítnici je 1 : 16 : 32. [10]

Rozložení hustoty fotoreceptorů vzhledem k fovee je vidět na **obrázku č. 5**.





Obrázek č. 5 – Hustota fotoreceptorů [11]

## 2.5. Fotochemie zrakových pigmentů

Citlivost lidského oka je dána přítomností zrakového pigmentu ve světločivných elementech. Oba typy fotoreceptorů mají ve svých vnějších výběžcích zabudovaný pigment nazývaný se *opsin*. Opsin se díky své odlišné chemické struktuře vyskytuje v obou typech fotoreceptorů a umožňuje tak jejich odlišnou spektrální citlivost na různé vlnové délky dopadajícího světla. Pátý typ opsinu se nachází v gangliových buňkách a nazývá se *melanopsin*, který nejvíce absorbuje modré světlo. [12–16]

### 2.5.1. Iodopsin

Iodopsin je fotosenzibilní zrakový pigment tvořený opsinem a 11 – cis – retinolem a nachází se v lidských očních čípcích. Celkem se rozlišují tři typy iodopsinu podle toho, který typ opsinu obsahuje. Typ obsaženého opsinu souvisí s tím, na jakou vlnovou délku světla je nejvíce citlivý. [12–17] Podrobnějšími poznatky o genetickém kódování jednotlivých opsinů, mutacích v kódování opsinů a jejich vlivu na barevné vidění pojednává článek vědců z Washingtonské univerzity [17].

**OPN1SW** (opsin 1) je čípkový pigment nejsenzitivnější na krátké vlnové délky světla (modrofialová část spektra). Nachází se v čípcích typu S a je kódován na chromozomu 7. [13]

**OPNIMW** (opsin 2) je druhým typem čípkového pigmentu, který je nejsenzitivnější na střední vlnové délky světla (zelenožluté světlo). Nachází se v čípcích typu M. Je zakódován na chromozomu 28, kde se nachází i třetí typ opsinu. [14]

**OPNILW** (opsin 3) je třetím typem čípkového pigmentu. Je nejsenzitivnější na dlouhé vlnové délky světla (červené světlo). Nachází se v čípcích typu L. [15]

V reakci na světlo jednotlivých vlnových délek dochází ke spuštění fotopigmentu uvnitř čípků, který spouští řadu chemických reakcí. Tyto reakce mění buňku v elektricky nabitou jednotku generující signál, který se poté přenáší do mozku. Tento přenos je umožněn díky *transducinu* (G-protein), který získává informace z čípků a předává je mozku, který signál interpretuje jako vidění. Nefunkční nebo geneticky změněné opsiny se projevují v procesu vidění poruchami ve vnímání barev.

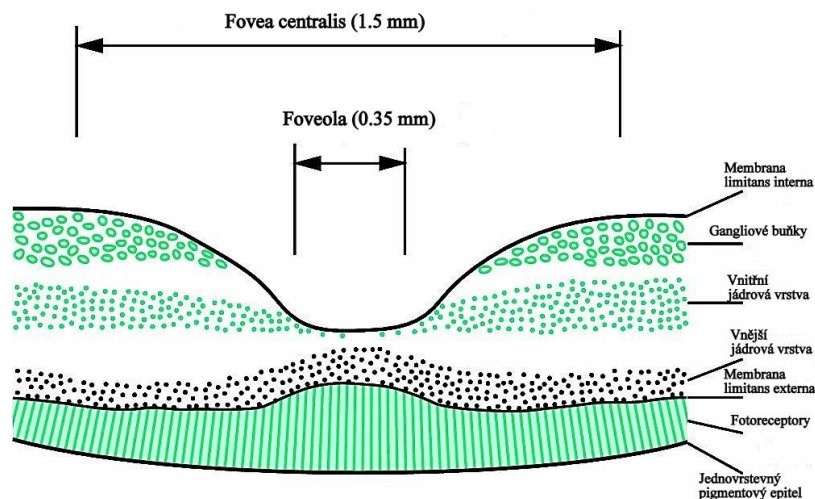
### 2.5.2. Rhodopsin

Rhodopsin je zrkový pigment nacházející se v tyčinkách. Vzniká spojením 11-cis-retinalu a rhod-opsinu. Po dopadu světelného záření dochází k transdukčnímu procesu vedoucímu k přeměně jednotlivých fotonů světelné energie na elektrickou. [18]

## 2.6. Žlutá skvrna

Žlutá skvrna (lat. *macula lutea*) je místem, kde se nachází oblast nejostřejšího vidění. Od okolní sítnice se odlišuje svým výrazně žlutým zbarvením, které získává díky obsahu žlutého barviva (*xantofyl*). Ve žluté skvrně se nacházejí ve větší míře pouze čípky a minimální množství cév.

Ve svém středu se žlutá skvrna (**obrázek č. 6**) prohlubuje a vzniká zde místo zvané *fovea centralis* o průměru 1,5 mm, její střed se nazývá *foveola centralis* s průměrem 0,35 mm. V této části žluté skvrny se nacházejí vnější úseky čípků. Vkluslý tvar vzniká odtážením ostatních buněk do stran, je tak umožněn přímý dopad slunečních paprsků přímo na fotoreceptory. [1,3] Na dně *fovea centralis* se nachází 2 500 čípků, v celé jamce o ploše 1,75 mm<sup>2</sup> pak 100 000 čípků. V této části je sítnice výrazně ztenčena na pouhých 0,1 mm. [2,3]



Obrázek č. 6 – Žlutá skvrna [19]

## 2.7. Zrakový nerv

*Zrakový nerv* (lat. *nervus opticus*) patří mezi párové hlavové nervy, označován je také jako II. hlavový nerv. Zrakový nerv je součástí zrakové dráhy, jejímž hlavním úkolem je přenos podnětu (obrazu) vzniklého na sítnici do zrakového centra v mozku. [1–3, 6, 20–22]

Svoji dráhu zrakový nerv začíná v místě zvaném *papilla nervi optici* (papila zrakového nervu) nebo také *discus nervi optici* (slepá skvrna) a končí v *chiasmatu*, kde se kříží s nasálními vlákny zrakového nervu přicházejícími z druhého oka. Papila se nachází 3 mm nasálně a 1 mm směrem nahoru od zadního pólu oka.

Celková délka zrakového nervu je 35 až 55 mm. Z embryonálního a histologického hlediska je zrakový nerv po výstupu z očnice tvořen přibližně milionem myelinizovaných nervových vláken uspořádaných ve svazcích a je obalen třemi obaly, *omozečnicí*, *měkkou plenou mozkovou* (*pia mater*), *pavučnicí*, *střední plenou* (*arachnoidea*) a *tvrdou plenou mozkovou* (*dura mater*).

## 2.8. Zraková dráha

*Zraková dráha*, na **obrázku č. 7**, se řadí mezi senzorické dráhy a je tvořena čtyřmi neurony. Vyplývá z toho tedy, že je multisynaptická a vysoce senzitivní. [1–3, 20]

Proto, aby vůbec mohlo dojít k přenosu podnětu a jeho následnému zpracování v mozku, je důležité, aby sluneční paprsky prošly okem až na sítnici, kde se nacházejí

první tři neurony zrakové dráhy. Po vstupu slunečních paprsků do oka, prostupují tyto paprsky skrze vícera optická prostředí, než dopadnou na sítnici. Mezi tyto systémy patří rohovka, přední komora, čočka a sklivec. Dopadem slunečních paprsků se na sítnici vytváří zmenšený a převrácený obraz. Na sítnici dochází k chemickému převodu světelných paprsků na elektrické impulsy, které se přesouvají dále ke zpracování do mozku.

*První neurony* zrakové dráhy se nacházejí přímo na sítnici a jsou přetransformovány do světločivných buněk, fotoreceptorů. Tyto buňky zachycují sluneční paprsky a předávají je k dalšímu zpracování druhým neuronům.

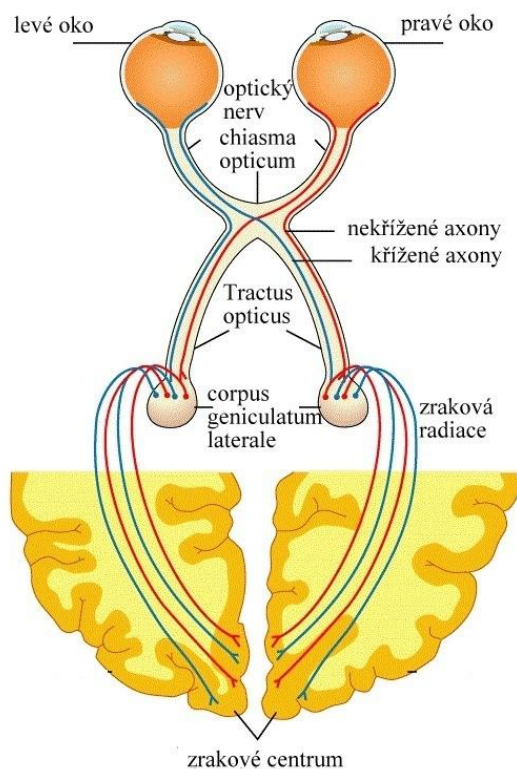
*Druhé neurony* vznikají spojením synapsí fotoreceptorů a bipolárních buněk. Tyto místa se nazývá *ganglion retinae*.

*Třetí neurony* se označují jako *ganglion opticum* a vznikají spojením výběžků bipolárních a gangliových buněk. Jejich dlouhé axony postupují ke slepé skvrně, kde se spojují a vystupují z očníce jako optický nerv.

Po výstupu z oka procházejí optické nervy skrze *canalis opticus*. Poté dochází k jejich zkřížení v místě zvaném *chiasma opticum*. V tomto místě se kříží axony optického nervu přicházející z mediální části sítnice. Axony optického nervu přicházející z temporální části sítnice se nekříží. Odtud pokračuje zraková dráha jako *tractus opticus* až do *corpus geniculatum laterale*.

V *corpus geniculatum laterale* se nacházejí *čtvrté neurony*. Čtvrté neurony jsou někdy také nazývány jako *primární zraková centra*.

*Gratioletův svazek* (zraková radiace) je široký svazek bílé mozkové hmoty a je tvořen neurity primárního zrakového centra. Axony buněk poté přecházejí do okcipitálního laloku (oblast area 17, 18 a 19), kde dochází ke zpracování podnětů.



**Obrázek č. 7 – Zraková dráha [23]**

## 2.9. Zraková korová centra

Zraková korová (**obrázek č. 7**) centra leží v okcipitálním (týlním) laloku a dělí se na *primární* a *sekundární zrkovou korovou oblast*. [1, 3, 6]

*Area 17 (area striata, Brodmannova area 17)* nebo také primární zrková korová oblast je místem, kam přicházejí axony gratioletova svazku. Dochází zde ke zpracování barevných podnětů, rozeznání tvarů a pohybu předmětů.

V *Area 18 (area parastriata, Brodmannova area 18)* a *area 19 (area peristriata, Brodmannova area 19)* se zpracovávají odstředivá vlákna z area 17 a jsou místem sekundární zrkové korové oblasti. Dochází zde ke sloučení zrkových informací zpracovaných v area 17 a jejich propojení s dalšími smysly nebo také ke zpracování barevného vjemu.

### 3. Poruchy barevného vidění, jejich příčiny a jejich testování

#### 3.1. Poruchy barevného vidění a jejich příčiny

Poruchy barevného vidění rozdělujeme do tří kategorií, *poruchy vrozené* (genetická predispozice), *poruchy získané* (úraz, onemocnění oka) a *dočasně získané*. Poruchou barevného vidění je myšleno neschopnost rozlišovat některou z barev nebo v závažnějších případech i celková nemožnost vidět barvy. Nejčastější poruchou barevného vidění je špatné rozlišování mezi červenou a zelenou, méně často potom mezi žlutou a modrou. [4, 18, 24, 25–27] Studie [28–30] se věnují poruchám barevného vidění a jejich testování.

*Normální trichromat* je osoba, který má všechny druhy čípků a vnímá jakoukoliv libovolnou barvu, tj. nemá porušený barvocit. [18] Simulace normální trichromazie je na **obrázku č. 8A**.

##### 3.1.1. Poruchy vrozené

###### 3.1.1.1. Monochromazie

*Monochromazie* je také někdy nazývána jako barvoslepost (barevná slepota) tzn., že osoby nerozlišují žádnou barvu, nemají tak možnost barevného vidění. Jedná se o to, že při této poruše nejsou v oku přítomny čípky nebo v nich došlo ke genetické změně či jsou zcela nefunkční. Rozeznáváme dvě hlavní monochromazie, *tyčinkou* a *čípkovou*. [4, 18, 25, 31–35]

Všechny simulace jsou provedeny pomocí *Coblis – Color Blindness Simulator*. [36]

*Tyčinková monochromazie* patří mezi nejčastější typ úplné barvosleposti. Jedná se o autozomálně dědičné onemocnění postihující muže a ženy se stejnou pravděpodobností. Zaznamenaný výskyt tohoto onemocnění je 1:30 000. Toto onemocnění je způsobeno absencí čípků na sítnici nebo jejich změnou v důsledku mutace ve fototransdukčním procesu čípků. [37] Toto onemocnění se projevuje kompletní neschopností rozlišování barev, fotofobií, dalekozrakostí, nystagmem a velmi nízkou zrakovou ostrostí. [31] Simulace tyčinkové monochromazie je na **obrázku č. 8B**.



**Obrázek č. 8** – **A)** *Simulace normální trichromazie*, **B)** *Simulace tyčinkové monochromazie* [36, 38]

Nejčastější čípkovou monochromazií je **čípková monochromazie typu S**. Je to velmi vzácné onemocnění (vázané na chromozom X) postihující muže (1:100 000), u žen je prokázáno málo výskytů (1:10 000 000 000). Onemocnění je způsobeno ztrátou nebo přesmykem genů na **M** a **L** čípcích. Vzhledem k tomu, že zůstává zachován pouze jeden barevný kanál, modrý, postižené osoby mohou vidět některé modré odstíny. [14, 31–33] Simulace čípkové monochromazie je na **obrázku č. 9**.



**Obrázek č. 9** – *Simulace čípkové monochromazie* [36, 38]

### **3.1.1.2. Dichromazie**

Dichromatické poruchy barevného vidění patří k častějším poruchám než monochromazie. Pojmenovány jsou podle typu čípku, který je zcela nefunkční nebo úplně chybí. Druhé dva čípky se snaží dotvořit vnímání všech barev ve smyslu trichromatické teorie. Mezi dichromatické poruchy patří *protanopie*, *deutanopie* a *tritanopie*. [4, 25, 35, 39]

**Protanopie** je dědičná porucha barevného vidění červené barvy způsobená genetickou změnou na chromozomu X, která se projevuje absencí čípku typu **L**. Jedinec s touto poruchou má problémy rozeznávat červenou a zelenou barvu. Touto poruchou trpí častěji muži (1 % populace). Simulace protanopie je uvedena na **obrázku č. 10**. [35,39]



**Obrázek č. 10** – Simulace protanopie [36, 38]

**Deuteranopie** je také dědičná porucha barevného vidění způsobena genetickou změnou na chromozomu X. Projevuje se absencí čípku **M**. Jedinec má stejně jako protanop problém rozpoznávat červenou a zelenou. Deuteranopií trpí asi 1 % mužů a 0,01 % žen. Simulace deuteranopie je zobrazena na **obrázku č. 11**. [35, 40]



**Obrázek č. 11** – Simulace deuteranopie [36,38]

**Tritanopie** je třetím typem dichromazie. U tohoto typu dichromazie není zcela prokázán původ poruchy, ale předpokládá se, že je způsobena nepřítomností čípku typu **S**. Takto postižení jedinci vnímají svět v odstínech červené a modré. Tato forma je



velmi vzácná, trpí jí asi 0,001 – 0,002 % populace. Tritanopie je autozomální dominantní dědičná porucha. Simulace tritanopie je uvedena na **obrázku č. 12**. [35, 41]



**Obrázek č. 12** – *Simulace tritanopie* [36, 38]

### **3.1.1.3. Anomální trichromazie**

*Anomální trichromazie* se řadí mezi nejčastější poruchy barevného vidění vůbec. Jedinci postižení těmito poruchami mají na sítnici všechny tři druhy čípků, ale mezi jednotlivými čípkami dochází k nepoměru z toho důvodu, že jeden z čípků je oslaben ve své funkci. Anomální trichromazii dělíme podle druhu defektního čípku na *protanomalii*, *deuteranomalii* a *tritanomalii*. [4, 25, 30, 35, 39]

**Protanomalie** je rovněž porucha barevného vidění přenášená přes chromozom X. Projevuje se poruchou čípku L (označen jako  $M'$ ) nebo jeho nedostatečným množstvím. Absorpční maximum čípku  $M'$  se přesouvá ke kratším vlnovým délkám (**obrázek č. 16 C**) oproti absorpčnímu maximu čípku typu L. Jedinec s touto poruchou zaměňuje červenou a zelenou barvu a zelenou a modrou barvu. Simulace protanomalie je uvedena na **obrázku č. 13**. [35, 39]



**Obrázek č. 13** – *Simulace protanomalie* [36, 38]

**Deuteranomalie** je porucha barevného vidění přenášená přes chromozom X a projevuje se poruchou čípku M (označen jako  $L'$ ) nebo jeho nedostatečným množstvím. Absorpční maximum čípku  $L'$  se posouvá směrem k delším vlnovým délkám (**obrázek č. 16 D**) oproti absorpčnímu maximu čípku typu M. Touto poruchou trpí asi 5 % mužské populace a 0,35 % ženské populace. Jedinec zaměňuje červenou, zelenou a žlutou. Simulace deuteranomalie je uvedena na **obrázku č. 14**. [35, 40]

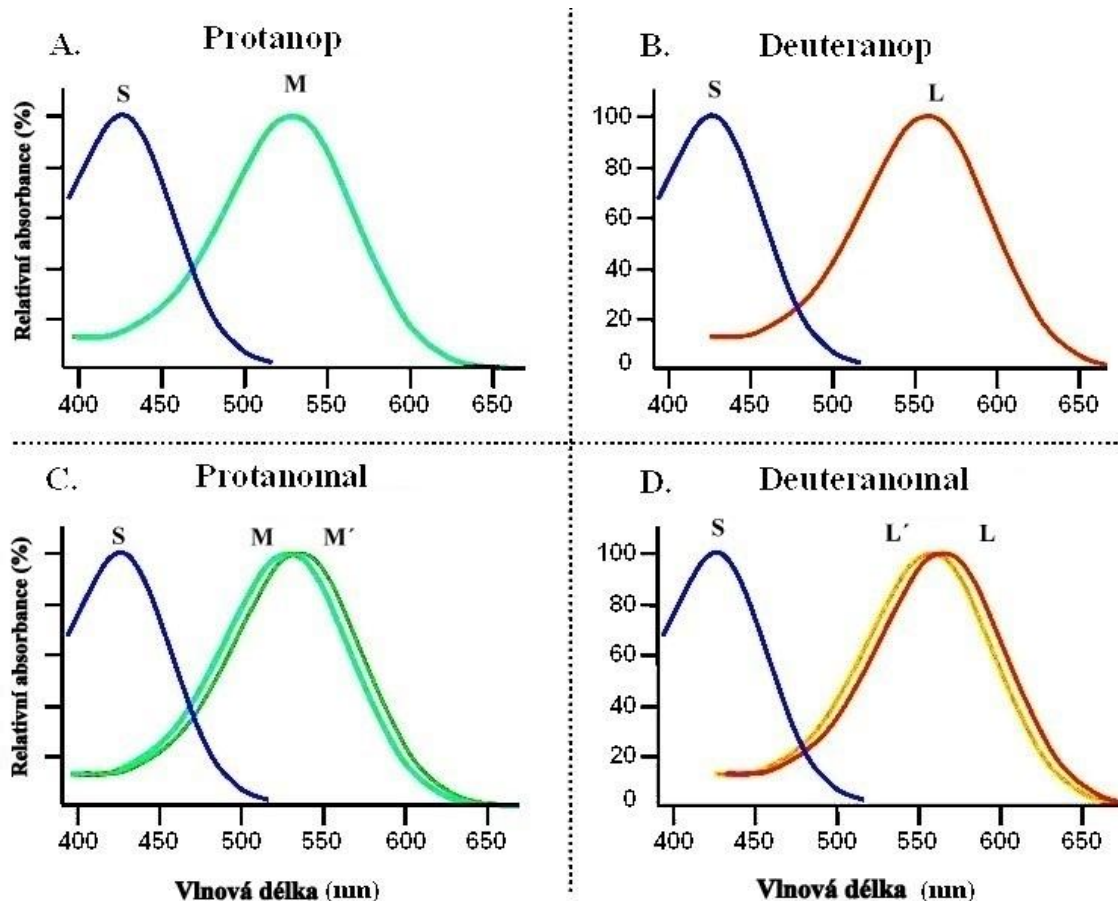


**Obrázek č. 14** – *Simulace deuteranomalie* [36, 38]

**Tritanomalie** je porucha barevného vidění přenášená autozomálně dominantně. Tato porucha se projevuje poruchou čípku typu S. Tritanomalie patří mezi velmi vzácná onemocnění. Simulace tritanomalie je uvedena na **obrázku č. 15**. [35, 40]



**Obrázek č. 15** – *Simulace tritanomalie* [36, 38]



Obrázek č. 16 – Relativní absorpční maxima čípků při poruchách barvocitu [42]

### 3.1.2. Poruchy získané

Získané poruchy barevného vidění mají souvislost s onemocněním zrakového ústrojí nebo vznikají jako důsledek užívání léků. Jakékoliv postižení sítnice či zrakového nervu vede k nevratné ztrátě barevného vnímání. [1, 4, 10, 18, 43, 44]

Mezi onemocnění, které způsobují poruchy barevného vidění patří *věkem podmíněná makulární degenerace*, *glaukom*, *diabetická retinopatie*, *katarakta*, *pigmentová retinopatie*, *čípková dystrofie*. [1, 10, 18, 43, 44]

### 3.1.3. Poruchy dočasně získané

Dočasně získané poruchy barevného vidění vznikají následkem užívání omamných a psychotropních látek, alkoholu. V literatuře je nalezneme pod pojmem *chromatopsie*. [18] Řadí se k nim *chloropsie* (zelené vidění), *erytropsie* (červené vidění), *xantopsie* (žlutavé vidění), *iantinopsie* (fialové vidění) a *kyanopsie* (modré

vidění). Ve většině případů se jedná o poruchu vidění dočasnou, která po odeznění účinků výše zmíněných látek odezní. Při dlouhodobé konzumaci se však mohou tyto poruchy podepsat na barevném vidění.

## 3.2. Testování barevného vidění

Vyšetřování barvocitu má v posledních několika letech stále větší význam. Nejčastěji se barvocit vyšetřuje v místnosti s denním osvětlením (nebo jemu podobným), aby byla zajištěna kompatibilita s denním světlem venku. Vyšetřování poruch barvocitu se dělí *podle způsobu, kterým je testování a vyhodnocování prováděno a podle účelu*, k čemu dané testy slouží. Nedílnou součástí testování barvocitu je i profesní barvocit (řidiči dopravních vozidel, piloti, pracovníci v textilním průmyslu a oddělení kvality kontroly). [18, 25, 27, 29]

*Testy podle účelu* se dělí do tří skupin na –

- a. *testy pro rozlišení vrozených a získaných poruch barevného vidění*
- b. *testy k určení druhu a míry poškození barevného vidění*
- c. *testy profesního barvocitu.*

*Testy podle způsobu provedení testování a vyhodnocení* se dělí na –

- a. *rozlišovací*
- b. *seřazovací*
- c. *míchací*
- d. *pojmenovávací.*

### 3.2.1. Rozlišovací testy

#### 3.2.1.1. Pseudoizochromatické testy

*Pseudoizochromatické testy* (PIC testy, pseudoizochromatické tabulky) patří k nejpoužívanějším testům používaným k testování barevného vidění. Jsou založeny na principu rozlišování, tj. znak nebo obrázek v jedné nebo dvou barvách je umístěn na pozadí s jinou barvou. Testy se liší typem screeningu, který používají pro odhalení poruchy barvocitu. Prvním typem jsou *testy transformační*, při kterých čte jedinec s poruchou barvocitu znak rozdílně než osoba bez poruchy. Druhým typem jsou *testy mizející*, kdy znak přečtou pouze osoby bez poruchy barvocitu. Třetím typem jsou *testy se skrytými znaky*, které rozliší pouze osoba s poruchou barvocitu. Čtvrtým typem jsou *testy diagnostické*, na kterém rozliší obrazec pouze ten jedinec s danou konkrétní poruchou barvocitu. [18, 25]

Pseudoizochromatické testy mají mnoho variant, těmi jsou například *Ishiharovy tabulky*, *AO – HRR* (American Optical Hardy-Rand-Rittler) *tabulky*, ad. [25, 45]

### 3.2.2. Seřazovací testy

Druhým nejčastěji používaným typem testu pro testování poruch barevného vidění jsou seřazovací testy, které slouží k vyšetření vrozených i získaných poruch barevného vidění. Testy jsou založeny na seřazování terčků či bavlnek podle odstínu, sytosti a jasů. [18, 25]

K těmto testům patří *Farnsworth-Munsellův 100 Hue test*, *Farnsworth-Munsellův Dichotomous D-15 Test*, *Lanthony desaturovaný D-15 test*, *Holmgrenovy přádelky*, ad.

#### 3.2.2.1. Farnsworth-Munsell 100 Hue test (FM 100 test)

*FM 100* je test sloužící ke zjišťování především získaných poruch barevného vidění. Užívá se však hojně také k testování profesního barvocitu pracovníků v odvětví průmyslu, ve kterých je vyžadován neporušený barvocit. [18, 25, 46]

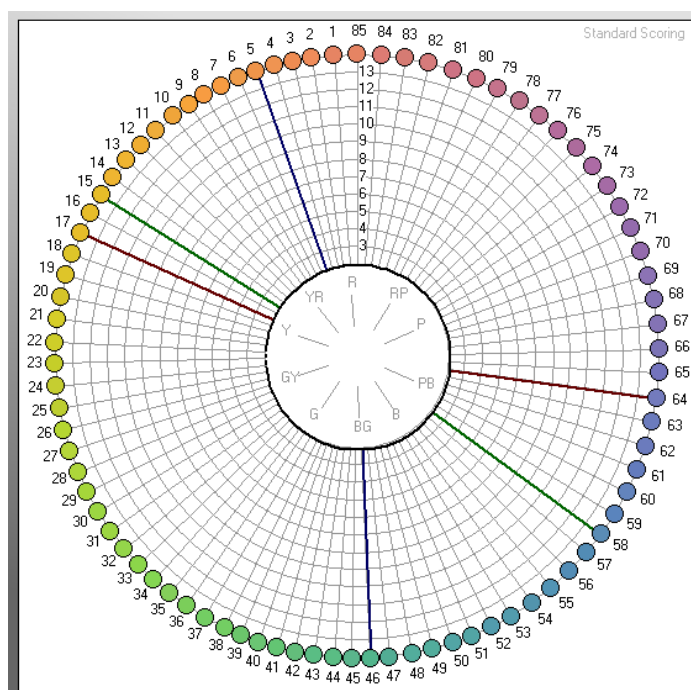
Test je založen na *Munsellově barevném atlasu* (odstín, sytost a jas). Je tvořen 85 barevnými terčiky jak je vidět na **obrázku č. 17**. Odstíny jednotlivých terčků jsou uzpůsobeny tak, aby odpovídaly barevným krokům mezi odstíny jednotlivých barev. Terčiky jsou umístěny ve 4 řadách, na začátku a na konci každého řádku jsou umístěny fixní terčiky. Úkolem vyšetřovaného je seřadit náhodně namíchané terčiky podle odstínu mezi fixními terčiky v jednotlivých řadách zvlášť. První řada je tvořena 22 terčiky (85 – 21), druhá až čtvrtá řada 21 terčiky (22 – 42, 43 – 63, 64 – 84).



Obrázek č. 17 – Farnsworth-Munsell 100 Hue test

Po seřazení všech čtyř řad dojde k vyhodnocení *celkového chybového skóre* (TES). Vyhodnocení se provádí tak, že se všechny řady obrátí barevným terčíkem dolů, na spodní straně je uvedeno číslo daného terčíku. Takto se pořadí zaznamená do předtištěného formuláře nebo se vyhodnocuje pomocí softwaru (FM 100 Hue Test Scoring Software version 3.0.). *Celkové chybové skóre* je vypočteno pomocí hodnot (na **obrázku č. 17** jsou to hodnoty 2), které získáme kontrolou pořadí. Chybné skóre pro jeden terčík se rovná součtu absolutních rozdílů mezi číslem chybného terčíku a terčíků, které s ním sousedí. Hodnota číslo 2 odpovídá umístění ve správném místě v řadě ( $|67 - 68| = 1$ ,  $|68 - 69| = 1$ ). Na základě celkového chybového skóre můžou být jedinci rozřazeni do kategorií *superior* (TES 0 – 19), *average* (20 – 99) a *low discrimination* (100 a více).

Na **obrázku č. 18** je zobrazen graf v polárních souřadnicích (standardní skóre), ve kterém se zobrazují hodnoty chybového skóre jednotlivých terčíků. Tři barevné křivky ukazují směr protanomalie (červené křivky), deuteranomalie (zelené křivky) a tritanomalie (modré křivky).



**Obrázek č. 18** – Graf polárních souřadnic FM 100 testu

### 3.2.2.2. Další seřazovací testy

**Farnsworth-Munsellův Dichotomous D-15 test** a **Lanthonyho Desaturated D-15 test** vycházejí z FM 100 testu. Oba dva jsou tvořeny 15 neupevněnými terčíky a jedním fixním terčíkem. [18, 25]

První zmíněný je určen k rychlejšímu a snadnějšímu testování poruch barevného vidění. Test využívá Munsellův barevného atlasu s hodnotou jasu 5 a hodnotou sytosti 4. Druhý test je obtížnější než první, protože barevné terčíky jsou desaturované (podíl bílé barvy, terčíky jsou světlejší a bledší). Tento test slouží k detekci vrozených i získaných poruch barevného vidění a umožňuje detekovat poruchu zjištěnou prvním testem. Vychází také z Munsellova barevného atlasu s hodnotami jasu 8 a sytosti 2. Vyhodnocení testů je uvedeno v odborné literatuře [282].

### 3.2.3. Míchací testy

Míchací testy jsou nejpresnější pro detekci poruch barevného vidění, zaměřují se především na poruchy v oblasti červené/zelené barvy. Výhodou tohoto typu testů je rozlišení dichromata, anomálního trichromata a normálního trichromata. Mezi míchací testy patří *anomaloskop* nebo *OSCAR test*. [18, 25]

**Anomaloskop** pracuje na principu aditivního míšení barev dvou monochromatických světél (červeného 671 nm a zeleného 546 nm), vzniklá barva se porovnává s předřazenou spektrální barvou (čistá sodíková žlutá), které jsou pozorovány na dvou polovinách pole pomocí okuláru. Princip je znám také jako *Rayleighova rovnice*  $R + G = Y$ . Postup vyhodnocení je uveden v odborné literatuře [18, 25].

**OSCAR test** patří mezi ruční míchací přístroje. Je tvořen malým testovým polem, které je osvětleno směsí červeného (650 nm) a zeleného (560 nm) světla, jejichž zdrojem jsou LED diody. Vyšetřovaný má za úkol nastavit diody tak, aby výsledné světlo blikalo žlutě.

### 3.2.4. Pojmenovávací testy

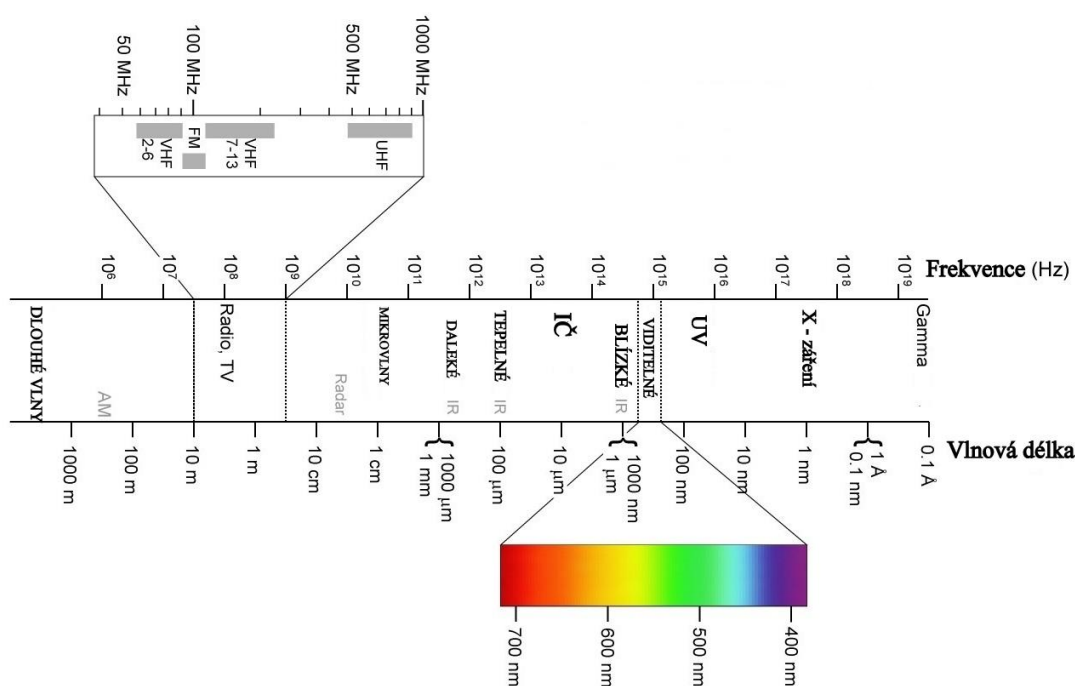
Pojmenovávací testy slouží především k testování profesního barvocitu. Mezi tyto testy patří **Farnsworth Lantern test**, který byl vyvinut pro testování barvocitu amerického námořnictva. Využívá červenou, zelenou a bílou barvu. V dnešní době jej plně nahradil test pomocí přístroje *OPTEC 900*. [18, 25]



## 4. Fotometrie a fotometrické veličiny

### 4.1. Elektromagnetické spektrum záření

*Elektromagnetické spektrum záření* (obrázek č. 19) zahrnuje širokou škálu elektromagnetických vln různých vlnových délek a frekvencí. *Optické záření* je součástí elektromagnetického spektra. Optické záření dopadá na zemský povrch a zahrnuje vlnové délky od 100 nm do 1  $\mu\text{m}$ . [47] Jeho součástí je část *ultrafialového záření* (100 až 380 nm), *viditelné záření* (380 až 780 nm) a část *infračerveného záření* (780 až 1000 nm). Viditelným zářením se rozumí oblast vlnových délek 380 až 780 nm, které je schopné vnímat lidské oko. Lidské oko je nejcitlivější na záření vlnové délky 555 nm. Viditelná část spektra má frekvenci  $3,9 \cdot 10^{14}$  Hz (červená barva) až  $7,9 \cdot 10^{14}$  Hz (modrá barva). Frekvence vlnění souvisí s barvou světla. [22, 47, 48]



Obrázek č. 19 – Elektromagnetické spektrum záření [49]

### 4.2. Kvantová teorie

Světlem se rozumí proud částic, *fotonů*, které mají nulovou klidovou hmotnost. Fotony se vyznačují vlastnostmi částic i vlnění, pohybují se *rychlostí světla ve vakuu*  $c$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a vzhledem k neustálému pohybu mají nenulovou energii. [22, 47, 48]

$$c = \frac{\lambda}{f} \quad (1)$$

kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu ( $299\,792\,458\,m \cdot s^{-1}$ ),  $\lambda$  je vlnová délka světla (m) a  $f$  je frekvence ( $Hz = s^{-1}$ ).

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2)$$

kde  $E$  je energie fotonu (J),  $h$  je Planckova konstanta  $6,626069 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (3)$$

kde  $p$  je hybnost fotonu ( $kg \cdot m \cdot s^{-1}$ ).

### 4.3. Fotometrie

*Fotometrie* je částí optiky zabývající se vztahem mezi světlem (oblast viditelného záření), jako formou energie, a jeho účinkem na lidské oko.

#### 4.3.1. Fotometrické a radiometrické veličiny

Na základě toho byly stanoveny *fotometrické, relativní veličiny*. Oproti tomu *radiometrické veličiny* slouží k popisu energie, které přenáší záření v celém elektromagnetickém spektru. *Spektrometrie* umožňuje přepočít mezi jednotlivými veličinami a ověření přesnosti a vyhodnocení naměřených hodnot. V **tabulce č. 1** je uveden přehled fotometrických a radiometrických veličin. Definice jednotlivých veličin je uvedena v odborné literatuře. [22, 47, 48, 50, 51]

Tabulka č. 1 – Přehled fotometrických a radiometrických veličin [48, 50]

Veličina	Označení veličiny	Jednotka	Veličina	Označení veličiny	Jednotka
světelný tok	$\Phi$	lm (lumen)	zářivý tok	$\Phi_e$	W
svítivost	$I$	cd = lm·sr <sup>-1</sup> (kandela)	zářivost	$I_e$	W·sr <sup>-1</sup>
intenzita osvětlení	$E$	lux	intenzita ozařování (ozáření)	$E_e$	W·m <sup>-2</sup>
jas	$L$	nt = cd·m <sup>-2</sup>	zář	$L_e$	W·sr <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup>
světlení	$M$	lm·m <sup>-2</sup>	intenzita vyzařování	$M_e$	W·m <sup>-2</sup>
osvit (expoze)	$H$	lx·s	expoze	$H_e$	W·s·m <sup>-2</sup>
světelná účinnost záření	$K$	lm·W <sup>-1</sup>			

#### 4.4. Adaptační mechanismy

Adaptace je schopnost oka přizpůsobit se různým světelným podmínkám. Lidské oko je schopno přizpůsobit se intenzitám osvětlení v rozsahu 0,25 lux až 10<sup>5</sup> lux. [50] Adaptační mechanismy souvisejí s *fotopupilárním reflexem zornic* (na světle se zornice zužuje, ve tmě naopak rozšiřuje), změnou citlivosti fotoreceptorů na sítnici a rozdílnou velikostí vjemových polí na sítnici (*Stiles – Crawfordův efekt*). Hlavním faktorem těchto mechanismů je však *fotochemický děj* probíhající ve vnějších úsecích fotoreceptorů po dopadu světla. [21, 50]

Mezi adaptační mechanismy řadíme vidění fotopické, skotopické a mezopické, adaptaci na světlo a tmu. S adaptačními mechanismy úzce souvisí Purkyňův jev. [20–22, 50]

#### 4.4.1. Adaptace na světlo a tmu

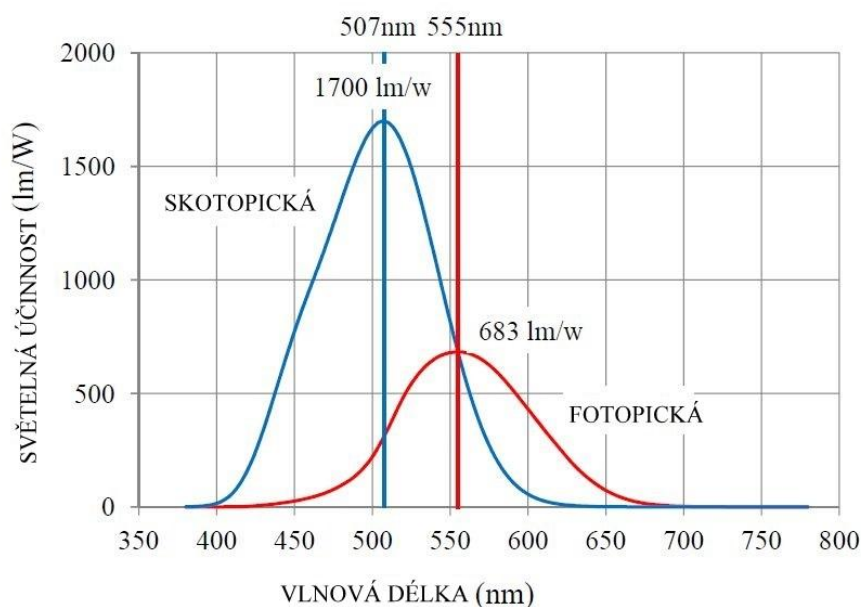
V případě, kdy oko adaptuje při přechodu z nižšího jasu na vyšší, tj. při přechodu ze tmy na světlo, dochází k rozpadu fotopigmentů a zmenšuje se tak citlivost fotoreceptorů. Celkové adaptace na světlo trvá mnohem kratší dobu než na tmu, a to asi 10 minut. [50]

Adaptace na tmu souvisí s přechodem ze světla (vyšší jas) do tmy (nižší jas). Její podmínkou je vytvoření zásob fotopigmentů. Adaptace na tmu je delší nežli na světlo a trvá obvykle 30 až 60 minut. [50]

#### 4.4.2. Vidění fotopické

Vidění fotopické je vidění, při kterém se uplatňují tři druhy čípků s různou spektrální citlivostí vzhledem k dostatečně vysoké hladině osvětlení. Uplatňuje se rovněž při pozorování předmětů s jasnem přesahujícím  $10^1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ . Fotopické vidění se též nazývá vidění denní. [50]

*Maximální světelná účinnost (obrázek č. 20)* při fotopickém vidění je dosažena na vlnové délce 555 nm a její hodnota je 683 lm/W. [18, 48, 52]



**Obrázek č. 20** – Světelná účinnost [53]

### 4.4.3. Vidění skotopické

Při sníženém osvětlení dochází k rozšíření zornic a světlo, které vstupuje do oka, dopadá na větší část sítnice. [4] Protože jsou tyčinky téměř tisíckrát citlivější na světlo než druhý typ fotoreceptorů, umožňují vidění při pozorování předmětů s jasnem nižším než  $0,001 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ . Vidění skotopické se též nazývá viděním nočním. Tyčinky rozpoznávají nejcitlivěji modrofialové světlo (krátkovlnné), naopak na světlo dlouhovlnné jsou méně citlivé (červenožluté), vlivem toho jsou na dálku lépe rozpoznány předměty modré než červené. [20, 21, 50, 52]

*Maximální světelná účinnost (obrázek č. 20) při skotopickém vidění je dosažena na vlnové délce 507 nm a její hodnota je 1700 lm/W. [18, 48, 52]*

### 4.4.4. Vidění mezopické

Při snižující se úrovni osvětlení dochází k přechodu od fotopického vidění směrem ke skotopickému vidění. Rozsah jasů pozorovaných předmětů je mezi 10 a  $0,001 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , vidění se po určitou dobu účastní oba druhy fotoreceptorů. Při tomto procesu dochází rovněž ke změně relativní spektrální účinnosti vlivem přechodu z oblasti, kde se vidění účastní ve větší míře čípky na oblast na sítnici, kde se vidění účastní ve větší míře tyčinky. Oblast mezi fotopickým a skotopickým viděním se nazývá mezopické vidění a změna relativní spektrální účinnosti se pak označuje jako Purkyňův jev. [4, 20, 21, 50, 54]

Pro popis změny poměrné spektrální citlivosti lidského oka v mezopické oblasti vidění se používá funkce poměrné spektrální citlivosti v mezopické oblasti vidění, respektive funkce mezopické světelné účinnosti. [55, 56]

*Tato funkce je definována [55]*

$$V_m(\lambda) = (1 - x) \cdot V'(\lambda) + x \cdot V(\lambda) \quad (4)$$

kde  $V_m(\lambda)$  je poměrná spektrální citlivost v mezopické oblasti vidění (nabývá hodnot od 0 do 1),  $x$  je kombinační faktor závislý na adaptačním jasu,  $V'(\lambda)$  je poměrná spektrální citlivost ve skotopické oblasti vidění (1700 lm/W při 507 nm) a  $V(\lambda)$  je poměrná spektrální citlivost ve fotopické oblasti vidění (683 lm/W při 555 nm). [55, 56, 57] Hodnoty poměrných spektrálních citlivostí jsou dostupné v odborné literatuře [58].

#### 4.4.5. Purkyňův jev

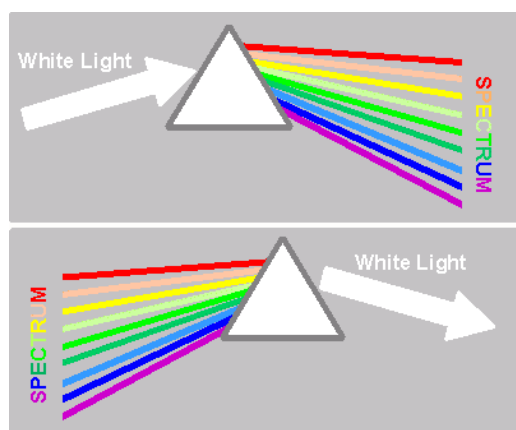
Tento jev je pojmenován po českém fyziologovi, anatomovi, biologovi, básníkovi a filozofovi Janu Evangelistovi Purkyně, který tento jev zkoumal již v letech 1823 až 1825. Purkyně pozoroval rozklad světla po průchodu hranolem v počáteční fázi adaptace na tmu a po uplynutí 10 minut. Během svého pozorování zjistil, že se nejjasnější oblast posunula ke kratším vlnovým délkám. [59] Tento fakt potvrzuje to, že lidské čípky jsou nejcitlivější na vlnovou délku 555 nm (fotopická křivka zde dosahuje svého maxima), zatímco lidské tyčinky maximálně na 507 nm (skotopická křivka zde dosahuje svého maxima, někdy uváděna hodnota 498 nm). Vlivem toho se modrá barva zdá světlejší než červená při nízkých osvětlenostech, při vyšších osvětlenostech je tomu naopak. [52] V různých literaturách a člancích [52, 54, 55, 57, 59] se Purkyňův jev popisuje jako tzv. *Purkyňův posun*, který souvisí s adaptací na tmu, kdy je sítnice více citlivá na kratší vlnové délky světla. V roce 1987 vědci využili Stiles–Crawfordova efektu [59] k tomu, aby dokázali, že krátkovlnné čípky (čípky typu S) nehrají žádnou roli v Purkyňově posunu.

Studie [54] se věnuje využití haploskopických barev pro simulaci barevného vzhledu při fotopické, mezopické a skotopické oblasti vidění a hodnocení barevných testů při různých intenzitách osvětlení. Popisuje změny sytosti, odstínu a světlo při hodnocení barev. Závěr studie je doporučení, aby byl brán v potaz Purkyňův jev na vzhled barev při nízkých hodnotách osvětlení.

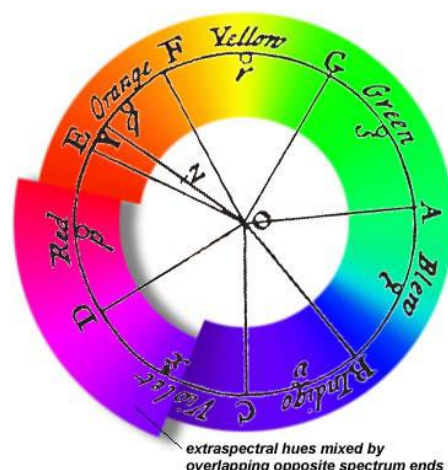
#### 4.5. Teorie barev a barevného vidění

Barevné vidění je stejně staré jako lidstvo samo. Avšak teprve v roce 1671 anglický fyzik a matematik *Isaac Newton* (1643 – 1727) předvedl experiment, kdy po průchodu úzkého svazku paprsků hranolem, se za hranolem promítá pás světla s různými barvami, což je vidět na **obrázku č. 21A**. Tento pás různě barevného světla Newton pojmenoval spektrem. Proto, aby potvrdil svoji teorii, že světlo je tvořeno rekombinací všech barev spektra, opakoval první pokus s přidáním dalšího hranolu (**obrázek č. 21B**), po jehož průchodu se barvy ze spektra vrátily zpět do úzkého svazku světla. Současně s tím popsal Newton barvy, které se ve spektru nacházely, a to červenou, oranžovou, žlutou, zelenou, modrou, indigo a fialovou. [4, 48]

Při dalších pokusech Newton dospěl k tomu, že kombinací dvou barev ze spektra vzniká barva třetí. Při kombinaci barev z opačného konce spektra (tj. červené a fialové) získal novou škálu purpurových barev. Na základě toho navrhl Newton barevný diagram (**obrázek č. 22**) ve tvaru kruhu (barevné odstíny), na jehož horním obvodu se nacházely čistě spektrální barvy, na dolním obvodu barvy purpurové, uprostřed potom barva bílá. Mezi středem s bílou barvou a obvodem se pak nacházely barvy tvořené míšením bílé barvy se spektrálními barvami. Při rotaci tohoto diagramu se všechny barvy jeví jako šedé, bezbarvé.



**Obrázek č. 21 – A) Rozklad světla hranolem,  
B) Rekombinace světla hranolem [60]**



**Obrázek č. 22 – Newtonův barevný  
diagram [61]**

Na tyto Newtonovy experimenty navázaly další, *Mariotte* v roce 1717 přišel s tím, že k získání jedné barvy postačí správná kombinace tří barev. Až v roce 1956 byl nalezen rukopis, ve kterém *Palmer* (1746 – 1826) již v roce 1777 potvrdil Mariottovy předpoklady a přidal k nim podklady pro existenci tří různě barevných receptorů na sítnici.

#### 4.5.1. Young – Helmholtz teorie

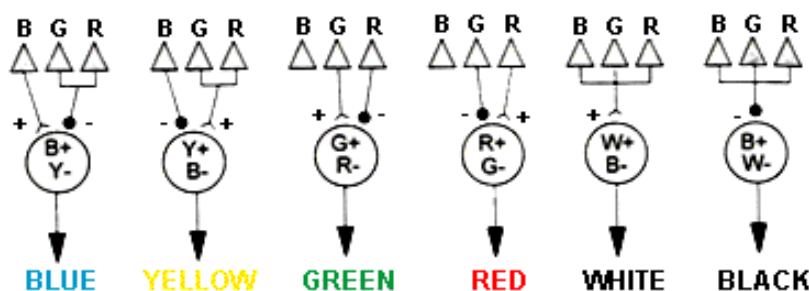
V roce 1802 *Thomas Young* (1773 – 1829) bez znalosti Palmerových zjištění definoval trichromatickou teorii barev, kdy řekl, že všechny barvy v přírodě jsou tvořeny třemi různými barvami, které pojmenoval jako *základní, primární*. Rovněž předpokládal přítomnost tří typů fotoreceptorů. Avšak nestanovil, které tři barvy jsou primární. [4, 48, 51, 52]

Po období padesáti let byla tato teorie považována za uspokojivou, i když nevysvětlovala přesné příčiny barevného vidění. Avšak v letech 1852 – 1866 *Hermann*

*von Helmholtz* přepracoval a vylepšil Youngovy myšlenky na základě vlastních pokusů a uveřejnil Youngovy myšlenky jako *Young – Helmholtzovu teorii*. Stanovil tři primární barvy – červenou, zelenou a modrou. Upřesnil, že výsledná barva je tvořena vzájemným poměrem jednotlivých základních barev (*aditivní míšení*) a jejich kombinací lze získat jakoukoliv jinou barvu světla, resp. osoba s normálním barevným viděním potřebuje kombinaci tří různých vlnových délek světla, aby odpovídala jedné vlnové délce ve viditelném spektru na rozdíl od Younga, který předpokládal, že jeden receptor reaguje pouze na jednu barvu. [4, 48, 51, 52]

#### 4.5.2. Oponentní teorie

*Edwald Hering* (1834 – 1918) na rozdíl od Younga a Helmholtze vykládá barevný vjem jako důsledek působení dvou oponentních mechanismů, dvou chromatických párů červeně – zeleného a modro – žlutého a jednoho achromatického páru černo - bílého, který vzniká jako odpověď na podráždění tyčinek a nese informaci o jasu. Teorie vysvětluje, proč vidíme žlutou, i když na sítnici není čípek, který by tuto část spektra absorboval a proč není možné vidět například modro-žlutou nebo červeno-zelenou, ale na druhou stranu je možné vidět zeleno-modrou, žluto-zelenou. Teorie je založena na současné inhibici a aktivaci spojení mezi jednotlivými čípkami a jejich následného zpracování bipolárními a gangliovými buňkami. Tyto procesy jsou zobrazeny na **obrázku č. 23**. [4, 48, 51, 52]



Obrázek č. 23 – Oponentní teorie [62]

Obě dvě výše zmíněné teorie se doplňují a umožňují tak popis procesů, které vznikají na různých úrovních zrakového systému. Young – Helmholtzova teorie popisuje procesy odehrávající se přímo na úrovni fotoreceptorů, na **obrázku č. 23** zobrazeny jako B G R, kdy nejprve dojde k inhibici a stimulaci čípků světlem.



Oponentní Heringova teorie poté popisuje procesy odehrávající se na neurofyzilogické úrovni, na **obrázku č. 23** zobrazeny jako B-Y, G-R a BK-W páry. [4, 48, 51, 52]

### 4.5.3. Další teorie

Dalším, kdo zkoumal barevné vnímání, byl *James Clerk Maxwell* (1831 – 1879), který použil v roce 1861 tři černobílé fotografie umístěné na stěně a tři projektory světla. Navíc před každý projektor umístil barevný filtr (červený, zelený a modrý). Předpokládal, že černobílé fotografie jsou stejně senzitivní na tři použité barvy. Díky tomu představil světu první barevnou fotografii a potvrdil tak Young – Helmholtzova teorii. Mezi další, kdo potvrdil přítomnost tří barevných detektorů v oku, byl v roce 1890 *Arthur Peter König* (1856 – 1901). V roce 1888 *Frederick Eugene Ives* (1856 – 1937) opakoval Maxwellovy pokusy a položil základy moderní barevné fotografie. [4, 48, 51, 52]

I když je barevné vidění a vnímání dodnes přesně prozkoumáno, vědci uznávají jako základ barevného vidění Young – Helmholtzovu teorii. [4, 48, 51, 52]

## 5. Barevné prostory a hodnocení barevných rozdílů

*Barva* je popsána kombinací tří souřadnic v barevném prostoru. Barevné prostory jsou metody umožňující určovat, vytvářet a představovat barvy. [63] Samotný pojem barva je velmi mnohoznačný výraz a při nesprávném použití může vést k nejasnostem. [64, 65] Barvu lze chápat jako vlastnost *zrakového počítka* (psychosenzorická oblast) nebo ve smyslu *vlastností světla* (světelný podnět, barevné světlo) a *předmětů* (barevný předmět).

*Vjem barvy* označuje vlastnost zrakového počítka, na jehož základě je pozorovatel schopen rozlišit rozdíl mezi dvěma plochami zorného pole, tyto plochy mají stejnou velikost, tvar a strukturu. Rozdíl mezi plochami má stejnou velikost jako rozdíl, který by vznikl změnou spektrálního složení světla. [22, 50] U metamerních barev tento princip neplatí, protože i při rozdílném spektrálním složení barevného podnětu je vjem barvy stejný.

### 5.1. Barevné prostory

#### 5.1.1. RGB model

RGB model patří mezi základní barevné modely. Tento model nejpřesněji odpovídá způsobu vnímání barev lidským okem. Je založen na principu *aditivního míchání barev* (červená, zelená a modrá).

*Barevné složky* (podněty) se získávají pomocí *barevných členitelů* takto:

$$R = \int_0^{\infty} \bar{r}(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (5)$$

$$G = \int_0^{\infty} \bar{g}(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (6)$$

$$B = \int_0^{\infty} \bar{b}(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (7)$$

kde  $E(\lambda)$  je poměrné spektrální složení zdroje světla podle vlnové délky. Pro viditelnou oblast záření jsou meze integrálu stanoveny mezi 380 a 780 nm.  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  jsou funkce trichromatických členitelů. [22, 48, 50]

Barevné souřadnice jsou poté získány z barevných podnětů:

$$r = \frac{R}{R + G + B} \quad g = \frac{G}{R + G + B} \quad b = \frac{B}{R + G + B} \quad (8), (9),$$

(10)

Pro identifikaci barvy je na základě rovnic (7), (8), (9) postačující znalost dvou barevných souřadnic (rovnice (10)).

$$r + g + b = 1 \quad (11)$$

### 5.1.2. CIEXYZ

CIEXYZ je matematický systém barev přijatý CIE (*Commission internationale de l'éclairage, Mezinárodní osvětlovací komise*) v roce 1931, proto také označovaný jako CIE 1931. [22, 48, 66, 67]

Na základě trichromatické teorie, která vychází z předpokladu vnímání barvy pomocí tří čípků v lidském oku, je citlivost k jednotlivým barvám vyjádřena pomocí barevných podnětů. Barevné podněty spektrální barvy pro vlnovou délku  $\lambda$  neboli *trichromatické členitelé* jsou  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  a  $\bar{z}(\lambda)$  a odpovídají zornému poli s prostorovým úhlem do  $2^\circ$  (tzv. *normální pozorovatel*). Tento úhel odpovídá vidění pomocí žluté skvrny. Protože do oka paprsky vstupují pod úhlem větším než  $2^\circ$ , byly v roce 1964 přijaty barevné podněty pro zorný úhel  $10^\circ$  (tzv. *doplňkový pozorovatel*). V textu se barevné podněty označují index 10.

Barevné (trichromatické) souřadnice příslušné spektrální barvy jsou definovány pomocí trichromatických členitelů takto

$$x = \frac{\bar{x}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}} \quad y = \frac{\bar{y}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}} \quad z = \frac{\bar{z}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}} \quad (12), (13),$$

(14)

$$x + y + z = 1 \quad (15)$$

Na základě rovnice (14) stačí k popisu barvy dvě ze tří souřadnic.

*Trichromatické složky* (barevné podněty) slouží k určení barevných souřadnic ze zdroje světla podle vztahů takto:

$$X = \int_0^{\infty} \bar{x}(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (16)$$

$$Y = \int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (17)$$

$$Z = \int_0^{\infty} \bar{z}(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (18)$$

kde  $E(\lambda)$  je poměrné spektrální složení zdroje světla podle vlnové délky. Pro viditelnou oblast záření jsou meze integrálu stanoveny mezi 380 a 780 nm.

Z barevných složek poté vypočteme barevné souřadnice takto:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (19), (20), (21)$$

Bere-li se v potaz *odrazivost*  $R(\lambda)$  předmětu pro vlnovou délku, výpočet barevných složek je takovýto:

$$X = \int_0^{\infty} \bar{x}(\lambda)R(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (22)$$

$$Y = \int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda)R(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (23)$$

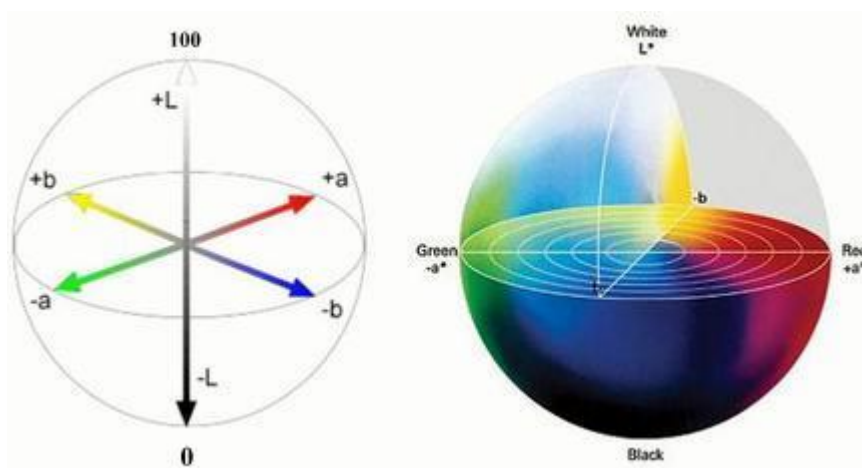
$$Z = \int_0^{\infty} \bar{z}(\lambda)R(\lambda)E(\lambda)d\lambda \quad (24)$$

kde  $E(\lambda)$  je poměrné spektrální složení zdroje světla podle vlnové délky. Pro viditelnou oblast záření jsou meze integrálu stanoveny mezi 380 a 780 nm. [22, 48, 50, 66] V případě, že je brána v potaz *spektrální propustnost*  $T(\lambda)$ , je v rovnicích (21) – (23) nahrazena odrazivost  $R$  propustností  $T$ .

### 5.1.3. CIELAB

Systém přijatý *Mezinárodní osvětlovací komisí* v roce 1976 v Londýně. Jedná se o oponentní systém barevného systému Hunter Lab uvedeného v roce 1943 *Richardem Hunterem*. [48, 66, 67]

CIELAB zvaný také jako *CIE 1976  $L^*a^*b^*$*  prostor je tvořen třemi vzájemně kolmými osami  $L^*$ ,  $a^*$  a  $b^*$  (**obrázek č. 24**). Svislá osa udává světlost, jas ( $L^*$ ) a nabývá hodnot o 0 (černá, tmavá,  $-L$ ) po 100 (bílá, světlá,  $+L$ ). Osy  $a^*$  a  $b^*$  označují jednotlivé barvy, přičemž červená ( $+a$ ) a zelená ( $-a$ ) jsou oponentní jako žlutá ( $+b$ ) a modrá ( $-b$ ). Jsou-li hodnoty obou os rovny 0, jedná se o neutrálně šedou barvu.



Obrázek č. 24 – Prostor CIELAB [68]

*CIELAB* se používá pro hodnocení barevných povrchů a pro hodnocení barevných rozdílů. Vychází ze systému *CIEXYZ*. [48, 66]

Platí:

$$L^* = 116Y^* - 16 \quad (25)$$

$$a^* = 500[X^* - Y^*] \quad (26)$$

$$b^* = 200[Y^* - Z^*] \quad (27)$$

kde

$$X^* = \left(\frac{X}{X_0}\right)^{1/3} \text{ pro } \frac{X}{X_0} > 0,008856$$

$$X^* = 7,787 \left( \frac{X}{X_0} \right) + 0,138 \text{ pro } \frac{X}{X_0} \leq 0,008856$$

$$Y^* = \left( \frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ pro } \frac{Y}{Y_0} > 0,008856$$

$$Y^* = 7,787 \left( \frac{Y}{Y_0} \right) + 0,138 \text{ pro } \frac{Y}{Y_0} \leq 0,008856$$

$$Z^* = \left( \frac{Z}{Z_0} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ pro } \frac{Z}{Z_0} > 0,008856$$

$$Z^* = 7,787 \left( \frac{Z}{Z_0} \right) + 0,138 \text{ pro } \frac{Z}{Z_0} \leq 0,008856$$

Hodnoty  $X$ ,  $Y$  a  $Z$  trichromatické složky barevného podnětu a  $X_0$ ,  $Y_0$  a  $Z_0$  jsou trichromatické složky normalizovaného zdroje světla.

## 5.2. Rovnice pro výpočet barevných odchylek

### 5.2.1. CIELAB

Výpočet barevného rozdílu pomocí rovnice  $\Delta E$  vychází z prostoru *CIELAB*, který definuje tři vzájemně kolmé osy  $L^*$ ,  $a^*$  a  $b^*$  (barevné souřadnice). Rovnice (27) je platná v případě, kdy se srovnávají dvě plochy stejné velikosti a tvaru, které jsou porovnávány na stejném pozadí, nejčastěji šedém či bílém a pozorovaném při osvětlení standardizovaným zdrojem světla. [48, 66] Celkový barevný rozdíl vyjadřuje míru velikosti barevného rozdílu mezi dvěma vzorky, tj. standardem a vzorkem. Charakter tohoto rozdílu pak upřesňuje rozdělení na jednotlivé složky barevných souřadnic. [66]

$$\Delta E = [\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2]^{1/2} \quad [66] \text{ (28)}$$

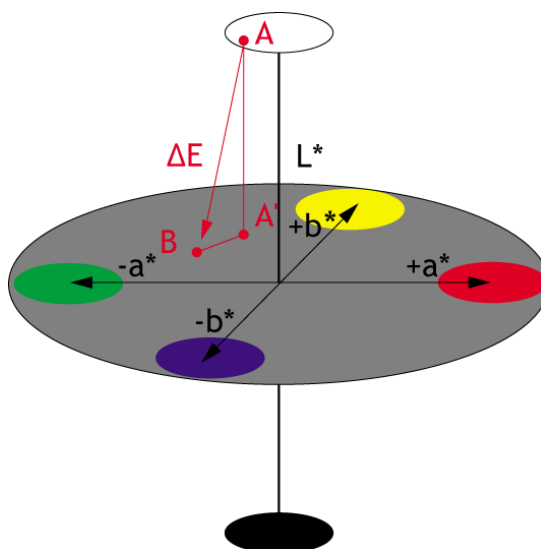
kde

$$\Delta L = (L_{vz}^* - L_{st}^*)$$

$$\Delta a = (a_{vz}^* - a_{st}^*)$$

$$\Delta b = (b_{vz}^* - b_{st}^*)$$

Na **obrázku č. 25** je zobrazen prostor *CIELAB* s vyznačeným rozdílem  $\Delta E$ .



**Obrázek č. 25** – *Prostor CIELAB s  $\Delta E$*  [69]

### 5.2.2. CMC (l:c)

CMC (l:c) rovnice pro výpočet malých barevných rozdílů byla přijata v roce 1984 výborem *Colour Measurement Committee of the Society of Dyers and Colourists of Great Britain* (Výbor pro měření barevnosti Spolku barvířů a koloristů ve Velké Británii). Rovnice (28) je založena na systému *CIELCH* (světlost, sytost a odstín). Váhové faktory  $l$  a  $c$  jsou zavedeny proto, aby mohla rovnice být využita pro různé účely. Pro textilní vzorky se užívá poměr 2:1 (acceptability dat), někdy se používá poměr 1:1 (perceptibility dat), který více odpovídá citlivosti lidského oka k barevným rozdílům. [48, 66]

V roce 1995 byla přijata za ISO standard pro použití v textilních aplikacích. Hodnoty  $\Delta L^*$  (jasová odchylka),  $\Delta C_{ab}^*$  (odchylka v sytosti, měrné čistotě),  $\Delta H_{ab}^*$  (odstínová odchylka) udávají rozdíl barevných souřadnic vzorku a standardu.  $S_L$ ,  $S_C$ ,  $S_H$  jsou váhové funkce závislé na poloze vzorku a standardu v barevném prostoru, vycházejí ze světlosti, sytosti a barevného odstínu. [448, 66, 70]

$$\Delta E_{CMC(l:c)} = \left[ \left( \frac{\Delta L^*}{l \cdot S_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C_{ab}^*}{c \cdot S_C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta H_{ab}^*}{S_H} \right)^2 \right]^{1/2} \quad [66] \quad (29)$$

kde

$$S_L = 1 + \frac{0,040975 \cdot L^*}{1 + 0,01765 \cdot L^*} \quad L^* > 16$$

$$S_L = 0,511 \quad L^* \leq 16$$

$$S_C = \frac{0,0638 \cdot C_{ab}^*}{1 + 0,0131 \cdot C_{ab}^*} + 0,638$$

$$S_H = S_C \cdot (TF + 1 - F)$$

$$F = \sqrt{\frac{(C_{ab}^*)^4}{(C_{ab}^*)^4 + 1900}}$$

$$T = 0,56 + [0,2 \cdot \cos(h + 168)] \quad \text{pro } 164^\circ \leq h < 345^\circ$$

$$T = 0,36 + [0,4 \cdot \cos(h + 35)] \quad \text{pro } h < 164^\circ \text{ a } 345^\circ \leq h$$

### 5.2.3. CIEDE2000

Nejnovější rovnice pro vyjádření malého barevného rozdílu získaného měřením a vizuálním hodnocením. Výpočet je založen na *rozdílu světlosti*  $\Delta L'$ , *rozdílu sytosti*  $\Delta C'$  a *rozdílu odstínu*  $\Delta H'$  společně s *váhovými koeficienty*  $S_L$ ,  $S_C$  a  $S_H$  a *parametrickými koeficienty*  $k_L$ ,  $k_C$  a  $k_H$  (1:1:1). Hodnoty parametrických koeficientů jsou stanoveny na hodnotu 1. [66, 70]

1. krok – výpočet barevných souřadnic  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  v barevném prostoru *CIELAB* podle rovnic (25), (26), (27). [66, 70]
2. krok – výpočet hodnot  $a'$ ,  $C'$  a  $h'$

$$L' = L^* \quad (30)$$

$$a' = a^* \cdot (1 + G) \quad (31)$$

$$b' = b^* \quad (32)$$

$$C'_{ab} = \sqrt{(a')^2 + (b')^2} \quad (33)$$

$$h'_{ab} = \tan^{-1} \left( \frac{b'}{a'} \right) \quad (34)$$



kde

$$G = 0,5 \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{\overline{C_{ab}^*}^7}{\overline{C_{ab}^*}^7 + 25^7}} \right)$$

kde  $\overline{C_{ab}^*}$  je aritmetický průměr měrné čistoty  $C_{ab,v}^*$  vzorku a  $C_{ab,s}^*$  standardu.  $h'_{ab}$  je ve stupních.

3. krok – výpočet hodnot  $\Delta L'$ ,  $\Delta C'$  a  $\Delta H'$

$$\Delta L' = L'_{vz} - L'_{st} \quad (35)$$

$$\Delta C' = C'_{ab,vz} - C'_{ab,st} \quad (36)$$

$$\Delta H' = 2 \sqrt{C'_{ab,st} \cdot C'_{ab,vz}} \sin\left(\frac{\Delta h'_{ab}}{2}\right) \quad (37)$$

kde

$$\Delta h'_{ab} = h'_{ab,vz} - h'_{ab,st}$$

Hodnota  $\left(\frac{\Delta h'_{ab}}{2}\right)$  je převedena ze stupňů na radiány.

4. krok – výpočet  $\Delta E_{00}$

$$\Delta E_{00} = \left[ \left( \frac{\Delta L'}{k_L \cdot S_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C'}{k_C \cdot S_C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta H'}{k_H \cdot S_H} \right)^2 + R_T \left( \frac{\Delta C'}{k_C \cdot S_C} \right) \cdot \left( \frac{\Delta H'}{k_H \cdot S_H} \right) \right]^{1/2} \quad (38)$$

Váhové koeficienty  $S_L$ ,  $S_C$  a  $S_H$  jsou definovány

$$S_L = 1 + \frac{0,015 \cdot (\bar{L} - 50)^2}{\sqrt{20 + ((\bar{L} - 50)^2)}} \quad (39)$$

$$S_C = 1 + 0,045 \cdot \overline{C'_{ab}} \quad (40)$$

$$S_H = 1 + 0,015 \cdot \overline{C'_{ab}} \cdot T \quad (41)$$

kde

$$T = 1 - 0,17 \cdot \cos(\overline{h'_{ab}} - 30^\circ) + 0,24 \cdot \cos(2 \cdot \overline{h'_{ab}}) + 0,32 \cdot \cos(3 \cdot \overline{h'_{ab}} + 6^\circ) - 0,20 \cdot \cos(4 \cdot \overline{h'_{ab}} - 63^\circ)$$

Hodnoty pro funkci  $\cos$  jsou převedeny ze stupňů na radiány.

*Rotační faktor* je definován

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C \quad (42)$$

kde

$$\Delta\theta = 30 \cdot \exp \left\{ - \left[ \left( \frac{\overline{h'_{ab}} - 275^\circ}{25} \right) \right]^2 \right\}$$

$$R_C = 2 \sqrt{\frac{\overline{C'_{ab}}^7}{\overline{C'_{ab}}^7 + 25^7}}$$

Hodnota  $\Delta\theta$  je do rovnice (42) dosazována v radiánech.

#### 5.2.4. Další rovnice

Včetně výše zmíněných rovnic jsou v průmyslu užívány pro vyjádření barevných rozdílů další rovnice. Mezi tyto rovnice patří například rovnice CIE94, *BFD* (*l:c*) a *LCD*. [66, 70]

## 6. Experimentální část

Experimentální část diplomové práce byla rozdělena na tři části. První částí experimentu bylo *objektivní měření sady barevných vzorků, výpočet barevných rozdílů rovnicemi CIELAB, CMC (l:c) a CIEDE2000 a zhodnocení predikční schopnosti uvedených rovnic*. Druhou část experimentu tvořilo *vyšetření barvocitu pomocí Farnsworth-Munsellova 100 Hue testu* a třetí částí experimentu bylo *subjektivní hodnocení sady barevných vzorků pomocí šedé stupnice skupinou pozorovatelů*.

Subjektivní hodnocení byla provedena v koloristické skříni *AtelierTechnik color* se světelným zdrojem D65, který simuluje polední denní světlo a jeho teplota chromatičnosti je 6 504 K. Koloristická skříň je zobrazena na **obrázku č. 26**.



**Obrázek č. 26** – Koloristická skříň *AT color*

Protože hodnocení probíhala pod více intenzitami osvětlení, byly použity neutrální filtry z PMMA (polymethylmetakrylátové) desek potažené autofóliemi s propustností světla 6 % (filtry označené B1, B2 a B3) a 16 % (filtry označené A1, A2 a A3). Hlavní důvodem pro použití těchto filtrů byl ten fakt, že nebylo nutné měnit spektrální složení použitého zdroje světla D65, tj. předřazením jednotlivých filtrů se moduloval pouze jas bez většího zatížení změny zdroje světla. Požadovaných intenzit osvětlení se dosáhlo postupnou kombinací jednotlivých filtrů. Tyto kombinace jsou popsány v **tabulce č. 2**. Autofólie byly nanесeny pomocí akrylátového lepidla firmou ABC fólie.

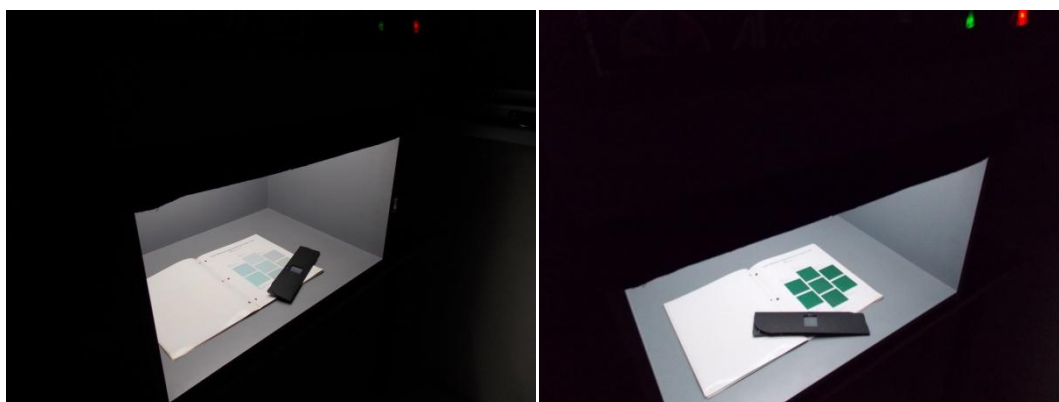
Intenzity osvětlení byly naměřeny přístrojem *Radiometer/Photometer GRP – 1* od společnosti *GOLDILUX*.

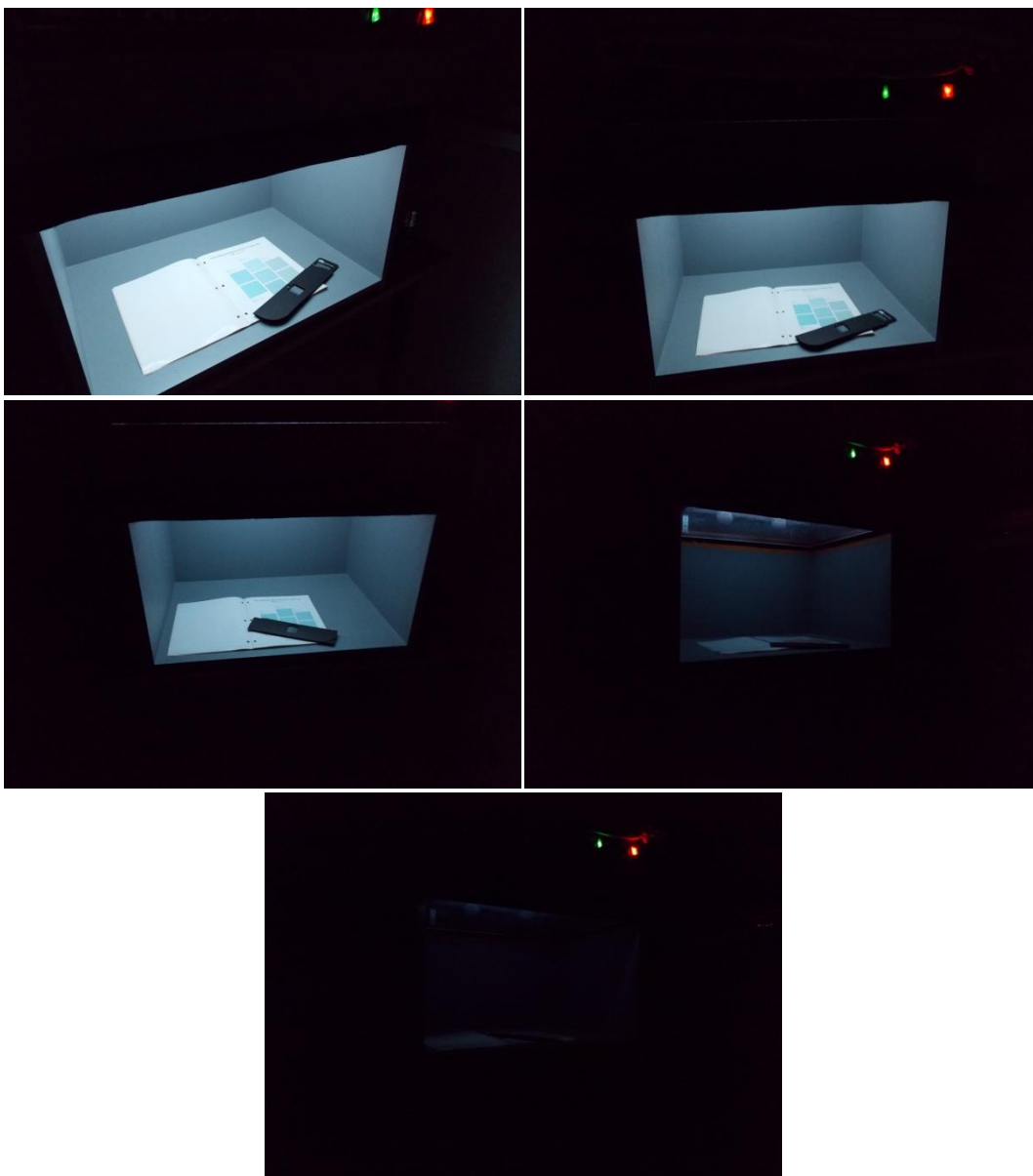
V **tabulce č. 2** jsou také uvedeny doby adaptace pro jednotlivé hladiny osvětlení, které byly dodržovány pro obě subjektivní hodnocení.

**Tabulka č. 2 – Intenzity osvětlení a doby adaptace**

Označení	Intenzita osvětlení $E$ (lux)	Intenzita osvětlení v $\ln E$ (lux)	Adaptační jasy ( $\text{cd/m}^2$ )	Kombinace filtrů	Doba adaptace (min)
bez označení (0)	1405,9	7,2	380	bez filtru	bez adaptace
1	217,46	5,4	60	A1	2
2	38,59	3,7	10,6	B1	5
3	6,11	1,8	1,6	A1+A2+A3	7
4	1,42	0,4	0,4	B1+B2	10
5	0,39	-0,9	0,1	B1+B2+A1	12
6	0,11	-2,2	0,03	B1+B2+A3	15

Na **obrázcích č. 27 až č. 33** jsou vidět jednotlivé intenzity osvětlení s předřazenými filtry v kombinacích uvedených v **tabulce č. 2**.





**Obrázek č. 27 – č. 33** – *Intenzita osvětlení s předřazenými filtry*

Na základě změřených intenzit osvětlení a přepočtených adaptačních jasů uvedených v **tabulce č. 2** lze tyto intenzity rozdělit do oblasti *fotopické* (nad 10 lux), *mezopické* (0,1–10 lux) a *skotopické* (pod 0,1 lux) úrovně intenzity osvětlení. Jednotlivé úrovně intenzity osvětlení jsou v tabulce barevně odlišeny.

## 6.1. Objektivní měření sady barevných vzorků

### 6.1.1. Úvod

Objektivní měření sady barevných vzorků bylo provedeno 25. listopadu 2014 na Fakultě textilní Technické univerzity v Liberci v Laboratoři měření barevnosti a vzhledu (LCAM). Cílem měření bylo změření barevných souřadnic  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  pro výpočet barevných rozdílů jednotlivých vzorků ke standardům pomocí rovnic *CIELAB*, *CMC(l:c)* a *CIEDE2000*. Společně s měřením barevných souřadnic byla změřena spektrální odrazivost jednotlivých vzorků a standardů.

### 6.1.2. Metodika

Měření barevných souřadnic  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  je založeno na kolmém dopadu světla na vzorek za použití zdroje světla D65 a doplňkového pozorovatele. Měření bylo provedeno pomocí *remisního spektrofotometru* společnosti *HunterLab MiniScan XE Plus* (obrázek č. 34 a obrázek č. 35), který byl propojen s přidaným softwarem v počítači. Přístroj měří v rozsahu vlnových délek 400 až 700 nm. [71]



Obrázek č. 34 – Obrazovka přístroje MiniScan XE Plus [71]



Obrázek č. 35 – MiniScan XE Plus [72]

Měření pomocí přístroje MiniScan bylo provedeno na sadě 112 barevných vzorků, které tvořilo 16 standardů, 48 vzorků s rozdílem  $\Delta E = 1$  a 48 vzorků s rozdílem

$\Delta E = 5$ . Všechny měřené vzorky jsou uvedeny v **příloze P5** ve **složce barevne\_vzorky**.

### 6.1.3. Postup měření

- 1) Po zapojení přístroje podle návodu bylo nastaveno měření v požadovaných hodnotách přímo na obrazovce přístroje a jeho propojení se softwarem v počítači.
- 2) Před samotným měřením sady barevných vzorků bylo nejprve nutné přístroj kalibrovat, aby měření proběhlo za standardních podmínek. Kalibrace přístroje proběhla pomocí černé a bílé skleněné destičky.
- 3) Po kalibraci se přistoupilo k měření jednotlivých vzorků. Nejprve byl vždy změřen standard, tj. středový vzorek na stránce. Přístroj se na vzorky přikládal pod úhlem  $90^\circ$ . Po přiložení přístroje ke vzorku se na přístroji potvrdilo měření. Po ustálení hodnot se v počítači zaznamenala a uložila data k jednotlivým vzorkům.
- 4) Po změření všech vzorečků byly hodnoty barevných souřadnic  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  a spektrální odrazivosti přeneseny do souboru MS Office Excel 2003 a uloženy.
- 5) Dalším krokem bylo vypočtení barevných rozdílů pomocí rovnic CIELAB,  $CMC(1:1)$ ,  $CMC(2:1)$  a  $CIEDE2000$ . Z hodnot spektrální odrazivosti na vlnových délkách 400 – 700 nm byly vytvořeny grafy průběhu spektrální odrazivosti v tomto pásmu vlnových délek.
- 6) Vyhodnocení predikční schopnosti rovnic bylo provedeno pomocí hodnoty *STRESS*, která slouží při vizuálním hodnocení pozorovatelů pro vyjádření shody/neshody mezi jednotlivými pozorováními. Do souboru byly exportovány vypočtené barevné rozdíly uvedených rovnic získaných podle bodu 5 tohoto postupu a byly porovnány s robustní průměrnou vizuální odchylkou všech pozorovatelů. Tento bod tohoto postupu byl proveden až po absolvování vizuálního hodnocení všemi pozorovateli. Výpočet hodnoty *STRESS* je při hodnocení predikční schopnosti rovnic totožný s níže uvedeným vzorcem (rovnice (48)) pro výpočet hodnoty *STRESS* při vizuálním hodnocení pozorovatelů.

#### 6.1.4. Výsledky a diskuze

Hodnoty souřadnic  $L^*$ ,  $a^*$  a  $b^*$  vzorků a hodnoty vypočtených barevných rozdílů vzorků pomocí rovnic *CIELAB*, *CMC* (1:c) a *CIEDE2000* jsou uvedeny v **příloze P1** v **tabulce č. 9**. Hodnoty spektrální odrazivosti vzorků jsou uvedeny v **tabulce č. 13 a č. 14** v **příloze P5**. Grafy průběhu spektrální odrazivosti jsou v **příloze P5** ve **složce prubeh\_odrazivost**. Výpočet podle bodu 5, výše uvedeného postupu, byl proveden pomocí rovnic (28), (29) a (38).

##### *Predikční schopnost rovnic*

V **tabulce č. 3** jsou soustředěny hodnoty *STRESS* použité pro porovnání predikční schopnosti rovnic při jednotlivých intenzitách osvětlení. Hodnota *STRESS* pro použité rovnice bylo vypočítána podle rovnice (48) a bylo porovnána s hodnotou *STRESS* robustní průměrné vizuální odchylky všech pozorovatelů.

**Tabulka č. 3 – Predikční schopnost rovnic**

<b>STRESS</b>	<b>CIELAB</b>	<b>CMC (1:1)</b>	<b>CMC(2:1)</b>	<b>CIEDE2000</b>
<b>1405,9 lux</b>	20,17	9,96	16,24	<b>9,67</b>
<b>217,46 lux</b>	19,92	9,89	16,32	<b>9,65</b>
<b>38,59 lux</b>	19,90	10,11	16,90	<b>9,19</b>
<b>6,11 lux</b>	19,96	10,14	16,90	<b>9,20</b>
<b>1,42 lux</b>	19,32	9,91	18,46	<b>8,32</b>
<b>0,39 lux</b>	18,88	<b>8,69</b>	18,55	8,78
<b>0,11 lux</b>	17,87	<b>7,30</b>	19,73	8,89

Z **tabulky č. 3** je patrné, že při porovnání predikční schopnosti rovnic pomocí hodnoty *STRESS* dosahuje nejvyšší predikční schopnosti (nejvyšší vypovídají hodnota) rovnice *CIEDE2000* při intenzitách osvětlení 1405,9 lux, 217,46 lux, 38,59 lux, 6,11 lux a 1,42 lux, naopak při intenzitě osvětlení 0,39 lux a 0,11 lux rovnice *CMC*(1:1). Přičemž rovnice *CIELAB* a *CMC*(2:1) mají nejnižší predikční schopnost ve srovnání s robustní průměrnou vizuální odchylkou všech pozorovatelů.



Je důležité zmínit, že obě výše zmíněné rovnice  $CMC(1:1)$  a  $CIEDE2000$  s vyšší predikční schopností mají hodnotu  $STRESS$  oproti rovnicím  $CIELAB$  a  $CMC(2:1)$  téměř na všech intenzitách osvětlení o jednu polovinu nižší, resp. hodnota  $STRESS$  říká, že čím nižší je její hodnota, tím lepší. Teorie říká, že rovnice  $CMC(1:1)$  je přizpůsobena lidskému zraku díky hodnotě váhových faktorů rovným 1 a rovnice  $CIEDE2000$  je určena především pro výpočet malých barevných rozdílů.

## 6.2. Vyšetřování barvocitu Farnsworth-Munsell 100 Hue testem

### 6.2.1. Úvod

Experimentální část vyšetřování barvocitu pomocí FM 100 testu (na **obrázku č. 36**) se uskutečnila ve dvou obdobích, a to od 3. prosince 2013 do 27. března 2014 a od 20. října 2014 do 29. října 2014 na Fakultě textilní Technické univerzity v Liberci v Laboratoři měření barevnosti a vzhledu (LCAM). Testováno bylo celkem 14 osob. Cílem vyšetření barvocitu bylo zjištění, zda je jedinec bez vady barvocitu a tedy jeho schopnost splnit třetí část experimentu.



Obrázek č. 36 – FM 100 test

### 6.2.2. Metodika

Všichni zúčastnění pozorovatelé testu byli před testováním tázáni na brýlovou korekci nebo korekci kontaktními čočkami a na rok narození. Z důvodu vyloučení kolize podle §3 a §9 zákona č. 101/2000 Sb., o ochraně osobních údajů nejsou u jednotlivých pozorovatelů uváděny jejich osobní údaje vymezené §4 citovaného zákona.

Testování probíhalo v klimatizované místnosti laboratoře LCAM za úplné tmy se zatemněnými okny, kde byla umístěna koloristická skříň. Každý z pozorovatelů byl před testem seznámen s jeho průběhem a provedením vyhodnocení. Každý pozorovatel podstoupil vyhodnocování testu jednou pod všemi intenzitami osvětlení, kterou jsou uvedeny výše v **tabulce č. 2**.

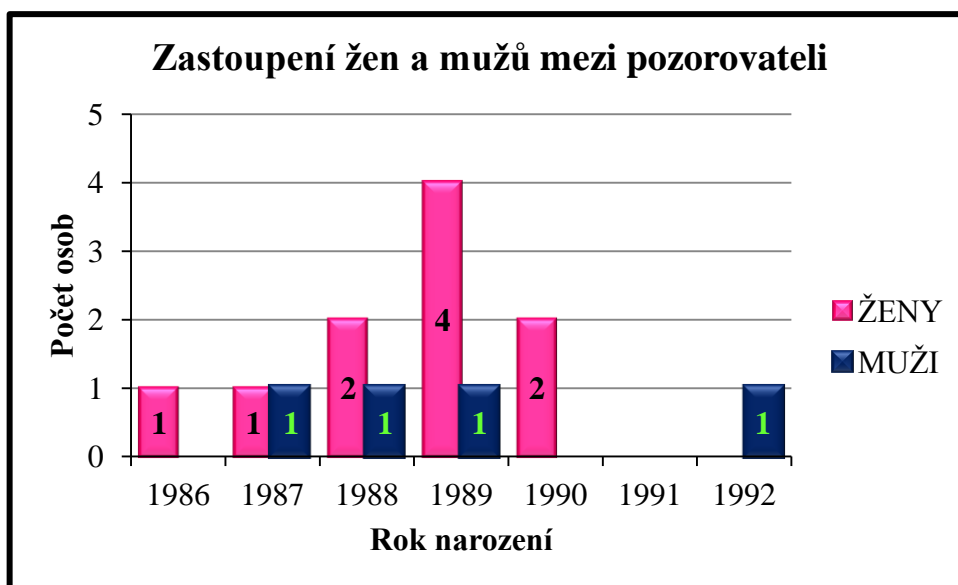
### 6.2.3. Pozorovatelé

Na základě výše citovaného zákona bylo každému pozorovateli na začátku přiřazeno číslo, pod kterým jeho testování proběhlo. Čísla jednotlivých pozorovatelů spolu s pohlavím a rokem narození jsou zaznamenány v **tabulce č. 4**. Číslo sloužilo k identifikaci pozorovatele během prováděného experimentu a během vyhodnocení výsledků.

**Tabulka č. 4 – Identifikace pozorovatelů**

Označení	Rok narození	Pohlaví
1	1987	žena
2	1992	muž
3	1989	muž
5	1990	žena
6	1986	žena
7	1989	žena
8	1989	žena
9	1990	žena
10	1989	žena
11	1988	žena
12	1987	muž
14	1988	muž
15	1988	žena
16	1989	žena

Graf zastoupení žen a mužů mezi pozorovateli je spolu s ročníky jejich narození zanesen na **obrázku č. 37**. Celkový počet pozorovatelů byl 14, z toho 10 žen a 4 muži.



Obrázek č. 37 – Graf zastoupení žen a mužů mezi pozorovateli

#### 6.2.4. Postup měření

- 1) Seznámení pozorovatele s průběhem celého testu a jeho vyhodnocením.
- 2) Ztemnění místnosti a náhodné zamíchání terčů v řadách 1 až 4 pro následné seřazení pozorovatelem mezi fixními terčíky.
- 3) Po seřazení všech řad byly zaznamenány hodnoty terčů přímo do softwaru a vyhodnoceno celkové chybové skóre (TES) a vygenerován graf polárních souřadnic.
- 4) Body 2 a 3 byly opakovány ještě 6krát, tj. pro každou intenzitu osvětlení zvlášť.

#### 6.2.5. Výsledky a diskuze

Každý z pozorovatelů měl po absolvování testování FM 100 testem 7 grafů polárních souřadnic. Na základě výsledků testu pod intenzitou osvětlení 1405, 9 luxů byli pozorovatelé rozděleni do kategorií superior, average a low discrimination. Hodnoty TES, podle kterých bylo rozdělení do kategorií provedeno, jsou uvedeny v **tabulce č. 5**.

Níže jsou uvedeny grafy polárních souřadnic pozorovatele č. 2 (**obrázek č. 38 A – G**) a pozorovatele č. 5 (**obrázek č. 39 A – G**). Pozorovatel pod číslem 2 je muž narozený v roce 1992 z kategorie average. Hodnoty TES této osoby jsou v **tabulce č. 6a**. Pozorovatel pod číslem 5 je žena narozená v roce 1990 z kategorie superior. Hodnoty TES této osoby jsou uvedeny v **tabulce č. 6b**.

Tabulka č. 5 – Rozdělení pozorovatelů do kategorií při 1405,9 luxech

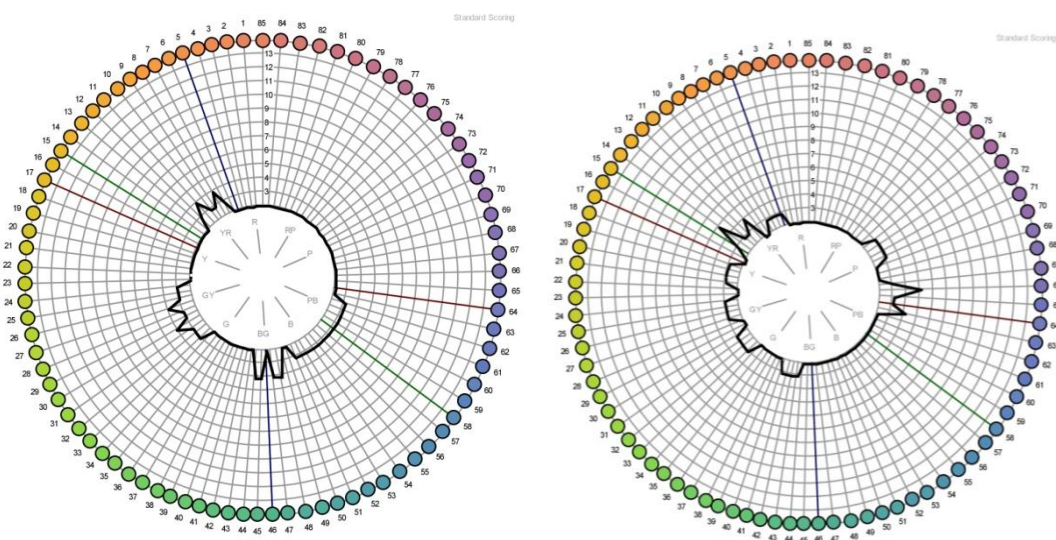
Pozorovatel	TES	Kategorie	Pozorovatel	TES	Kategorie
1	20	average	9	76	average
2	40	average	10	32	average
3	16	superior	11	48	average
5	8	superior	12	28	average
6	16	superior	14	36	average
7	40	average	15	8	superior
8	28	average	16	8	superior

Grafy polárních souřadnic ostatních pozorovatelů jsou uvedeny v **příloze P6** společně s hodnotami TES při všech intenzitách osvětlení pro jednotlivé pozorovatele.

Výsledky FM 100 testu (TES) je uvedeno v **tabulce č. 10** v **příloze P2**. V této tabulce jsou vyznačeni pozorovatelé superior a pozorovatel č. 14.

Tabulka č. 6a – TES pozorovatele č. 2

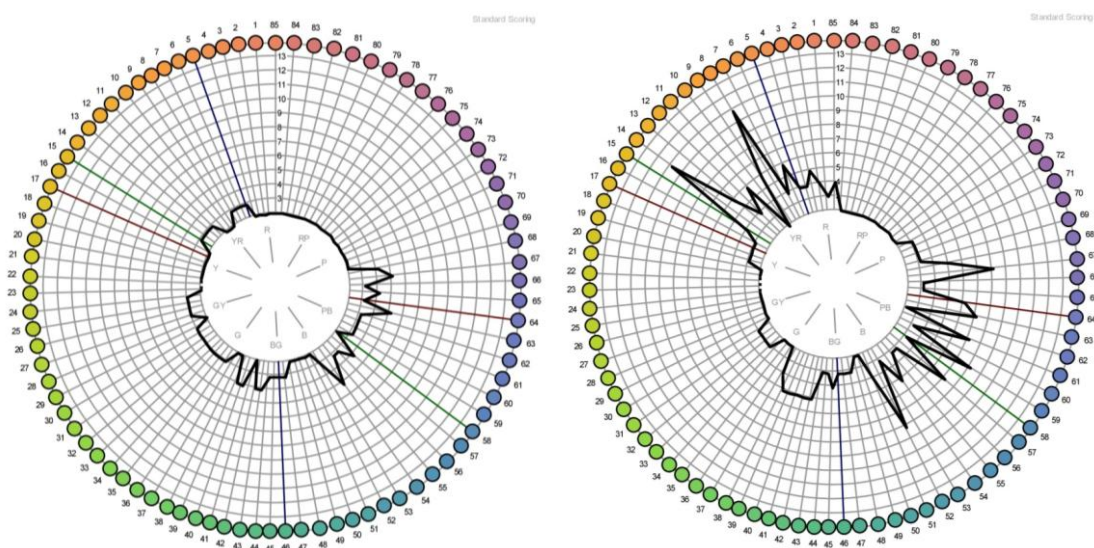
Pozorovatel	Intenzita osvětlení	0	1	2	3	4	5	6
2	TES	40	40	56	140	564	696	924



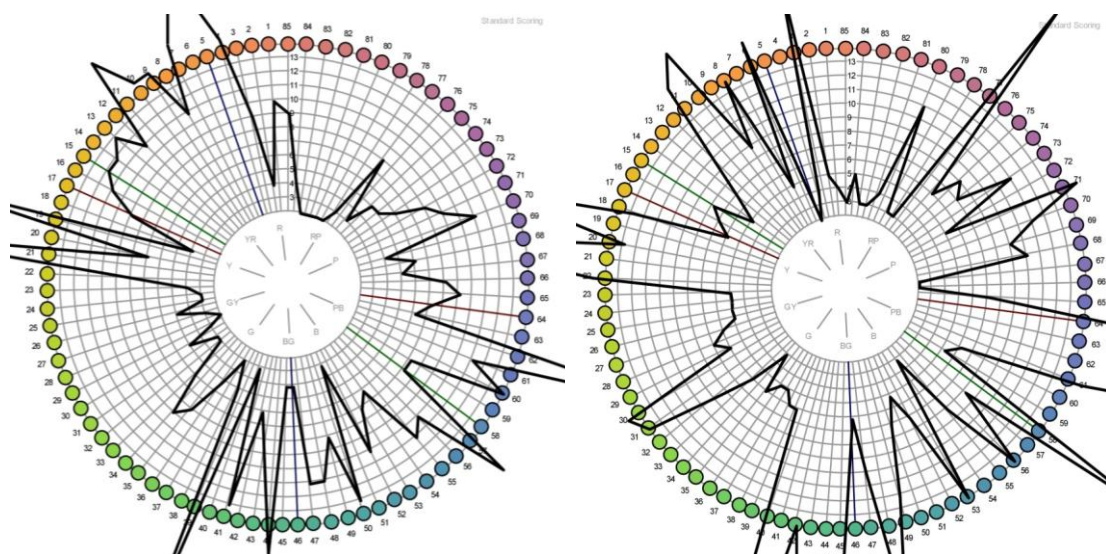
Obrázek č. 38 – A) Graf polárních souřadnic 2F,

B) Graf polárních souřadnic 2F1

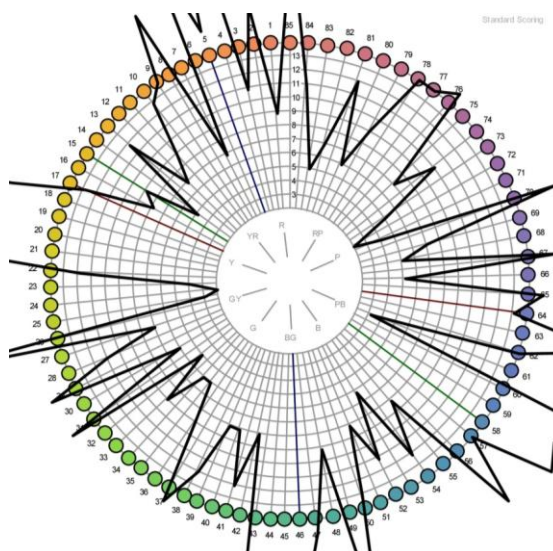




Obrázek č. 38 – C) Graf polárních souřadnic 2F2,  
D) Graf polárních souřadnic 2F3



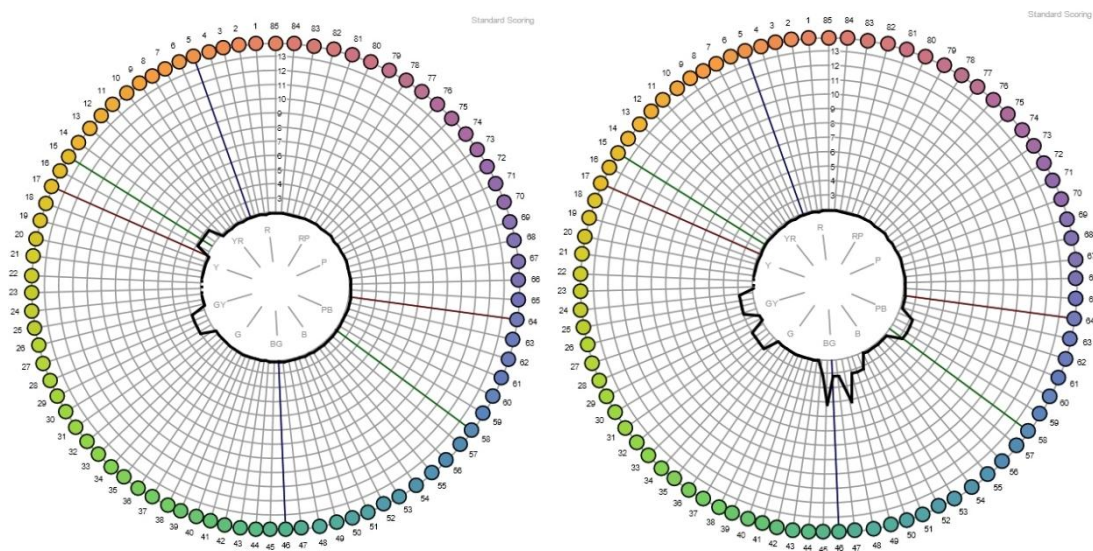
Obrázek č. 38 – E) Graf polárních souřadnic 2F4,  
F) Graf polárních souřadnic 2F5



Obrázek č. 38 – G) Graf polárních souřadnic 2F6

Tabulka č. 6b – TES pozorovatele č. 5

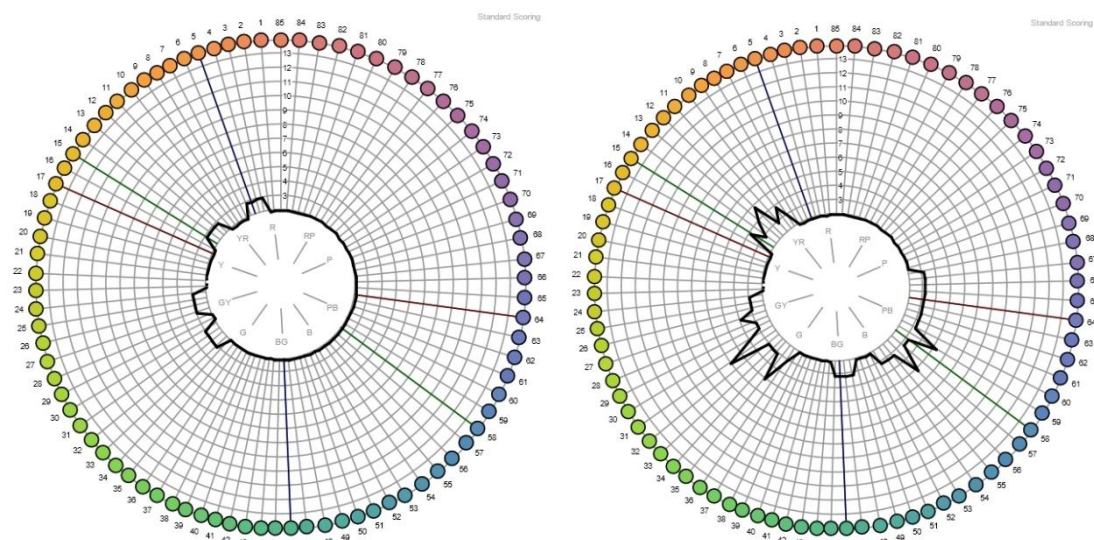
Pozorovatel	Intenzita osvětlení	0	1	2	3	4	5	6
5	TES	8	24	16	56	308	340	596



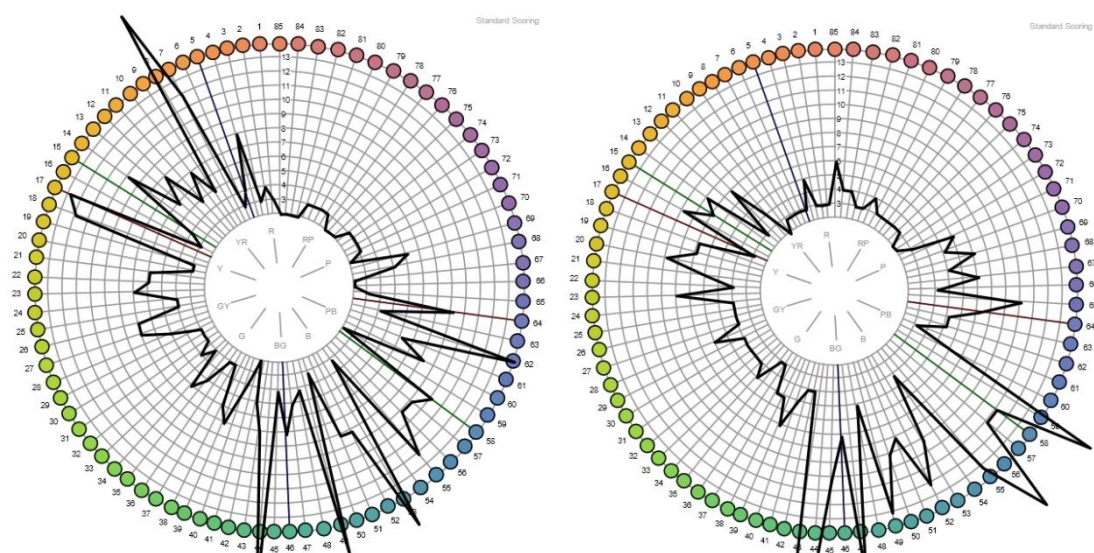
Obrázek č. 39 – A) Graf polárních souřadnic 5F,

B) Graf polárních souřadnic 5F1



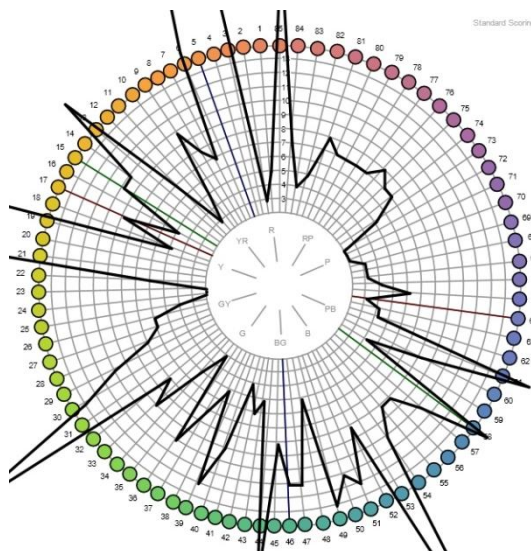


**Obrázek č. 39 – C) Graf polárních souřadnic 5F2,  
D) Graf polárních souřadnic 5F3**



**Obrázek č. 39 – E) Graf polárních souřadnic 5F4,  
F) Graf polárních souřadnic 5F5**





**Obrázek č. 39 – G) Graf polárních souřadnic 5F6**

Jak uvádí **tabulka č. 5**, celkem 5 osob bylo zařazeno do kategorie superior a 9 osob do kategorie average. Toto rozřazení do kategorií bylo následně užito v další části experimentu. Na základě výsledků FM 100 testu byli všichni jedinci připuštěni k další fázi experimentu. Žádný z pozorovatelů nevykazoval po absolvování testu vadu barvocitu.

V rámci vyhodnocení FM 100 testu je důležité zmínit, že u pozorovatelů č. 6, 7, 8, 9, 10, 11 a 12 došlo ke snížení TES (**tabulka č. 10**) u druhé intenzity osvětlení (217,46 lux). Tento fakt mohla zapříčinit neznalost s hodnocením tohoto testu a potřeba osvojit si provádění daného testu. Dalším důležitým faktorem pak mohla být adaptace na další intenzitu osvětlení.

Pozorovatel č. 14 byla zařazena do zvláštní samostatné kategorie vzhledem k tomu, že je nositelem dioptrické korekce se samozabarvovacími brýlovými čočkami. Ve vyhrazeném čase na provedení experimentu nebyla nalezena osoba shodného pohlaví s dioptrickou korekcí se samozabarvovacími brýlovými čočkami. Pozorovatel č. 14 sice neměl při první intenzitě osvětlení nejvyšší TES, avšak u druhé intenzity osvětlení se po vyhodnocení testu na dané intenzitě osvětlení dostal do kategorie low. Takto označená kategorie (velmi vysoké TES) se u ostatních pozorovatelů byla až od osvětlení 6,11 lux, resp. 1,42 lux.

Osoby s dioptrickou korekcí s antireflexní úpravou brýlových čoček nejsou z testu vyloučeny, vzhledem k tomu, že tato úprava skel snižuje oslnění pozorovatele při ostrém denním či umělém osvětlení, při řízení snižuje oslnění způsobené reflektory protijedoucích vozidel, snižuje námahu očí, tj. zvyšuje komfort nošení brýlí

a v neposlední řadě umožňuje jasnější a kontrastnější pohled přes brýlové čočky.  
Z testování nejsou vyloučeni nositelé kontaktních čoček.

## 6.3. Subjektivní hodnocení sady barevných vzorků

### 6.3.1. Úvod

Subjektivní hodnocení sady barevných vzorků pomocí šedé stupnice na skupině pozorovatelů bylo uskutečněno ve dvou blocích, tj. od 10. prosince 2013 do 20. května 2014 a od 29. října 2014 do 12. listopadu 2014 na Fakultě textilní Technické univerzity v Liberci v Laboratoři měření barevnosti a vzhledu (LCAM). Cílem subjektivního hodnocení byl výpočet vizuální odchylek všech pozorovatelů a hranice přechodu mezi fotopickou, mezopickou a skotopickou oblastí na základě Purkyňova jevu.

### 6.3.2. Metodika

Všichni zúčastnění pozorovatelé byli před testováním seznámeni s průběhem a postupem hodnocení. Každý z pozorovatelů hodnotil barevné vzorky celkem 5krát při každé intenzitě osvětlení. Mezi jednotlivými hodnoceními měl jedinec alespoň 24 hodinou pauzu z důvodu zkreslení hodnocení a odpočinku zraku vzhledem k náročnosti hodnocení. Jak bylo napsáno výše, doba adaptace se na jednotlivých intenzitách osvětlení lišila, celková doba adaptace byla 51 minut. Adaptace byla nutná pro přizpůsobení zraku dané intenzitě osvětlení a také proto, že při předřazování jednotlivých filtrů se v místnosti měnila intenzita světla a nešlo tak předejít tomu, aby jedinec tuto změnu světla nezaregistroval. Celková doba testu byla u každého pozorovatele individuální a zkracovala se s počtem předchozích hodnocení, minimální doba hodnocení však byla 1 hodina 15 minut. Byl-li pozorovatelem nositelem dioptrické korekce či korekce kontaktními čočkami, bylo nutné zajistit, aby všechna hodnocení prováděl ve stejné korekci, tj. nebylo možné, aby absolvoval jedno hodnocení s kontaktními čočkami a ostatní hodnocení s brýlemi.

Porovnáváno bylo vždy 6 vzorků s jedním středovým vzorkem (standardem), a to celkem 16krát. Polovinu vzorků tvořily vzorky s rozdílem  $\Delta E = 1$  (vzorky č. 1 – 6, 13 – 18, 25 – 30, 37 – 42, 49 – 54, 61 – 66, 73 – 78, 85 – 90). Druhou polovinu tvořily vzorky s rozdílem  $\Delta E = 5$  (vzorky č. 7 – 12, 19 – 24, 31 – 36, 55 – 60, 67 – 72, 79 – 84, 91 – 96). Vzorky byly hodnoceny v pořadí od 1. po 16. standard pomocí *šedé stupnice*.

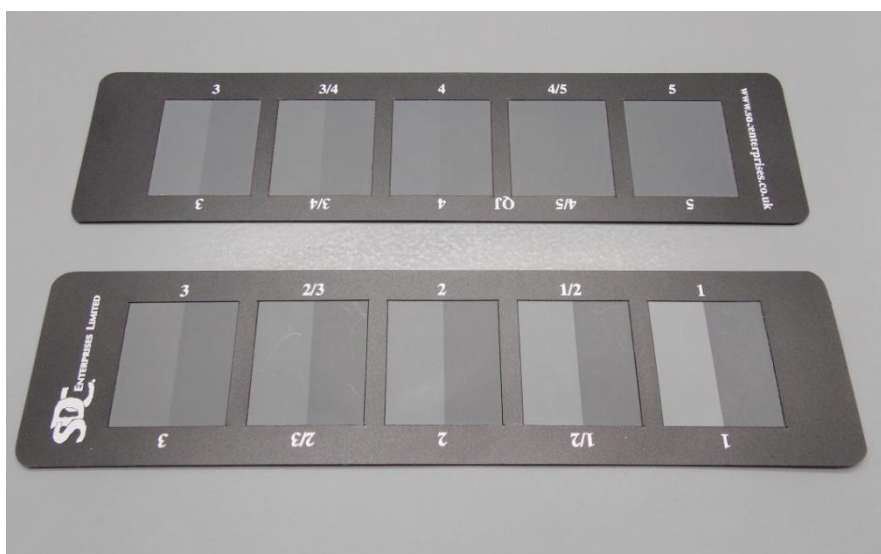
Použitá šedá stupnice byla vyrobena firmou *SDC Enterprises Limited* s certifikátem č. 1219 pro hodnocení barevných rozdílů a splňovala normu ISO 105

A02:1993. V **tabulce č. 7** jsou uvedeny stupně použité šedé stupnice a jejich přepočet na  $\Delta E$  splňující výše uvedenou normu.

**Tabulka č. 7 – Šedá stupnice [73]**

Stupeň	$\Delta E$ ISO 105 A02	Stupeň	$\Delta E$ ISO 105 A02
5	0,0	3	3,4
4-5	0,8	2-5	4,8
4	1,7	2	6,8
3-4	2,5	1-2	9,6
3	3,4	1	13,6

Stupeň 5 odpovídá „žádnému rozdílu“ mezi vzorky, stupeň 1 naopak odpovídá „velmi znatelnému rozdílu“ mezi vzorky. Na **obrázku č. 40** je zobrazena šedá stupnice.



**Obrázek č. 40 – Šedá stupnice**

### 6.3.3. Postup měření

- 1) Seznámení pozorovatele s průběhem a postupem hodnocení vzorků.
- 2) Každý list obsahoval 6 vzorků a jeden středový vzorek (standard). Hodnocení probíhalo tak, že pozorovatel přiložil šedou stupnici k vzorku a standardu

a hledal takový stupeň, který podle něho odpovídá rozdílu mezi těmito dvě vzorky. Hodnota udávaného stupně byla zaznamenána do souboru v počítači.

- 3) Bod dvě tohoto postupu se opakoval pro ostatní vzorky na listě a pro všechny ostatní listy. Přičemž vzorky na listě byly hodnoceny ve směru hodinových ručiček. Na **obrázku č. 41** je zobrazen jeden list se vzorky podle směru hodnocení.
- 4) Tento postup byl opakován pro hodnocení při ostatních intenzitách osvětlení. Mezi jednotlivými hodnoceními při intenzitách osvětlení byla striktně dodržována adaptační doba potřebná pro přizpůsobení zraku na danou úroveň osvětlení.
- 5) Po dokončení všech 5 opakování byly stupně udávané pozorovateli zkopírovány z formuláře do jednotlivých souborů podle intenzity osvětlení, kde probíhalo vyhodnocení.



**Obrázek č. 41** – Ukázka vzorků č. 7 – 12 a standardu 2STD

- 6) Pro další vyhodnocení na úrovních podle rozdělení FM testu byly ze souborů pro jednotlivé pozorovatele na všech intenzitách osvětlení zjišťovány průměry jednotlivých vizuálních hodnocení vzorků pozorovatelem, robustní průměry, vizuální odchylky jednotlivých vizuálních hodnocení vzorků pozorovatelem, průměrné vizuální odchylky, robustní průměrné vizuální odchylky a směrodatné odchylky vizuálních odchylek.

*Aritmetický průměr* je definován

$$\bar{x} = \frac{\sum_1^n x_i}{n} \quad (43)$$

kde  $x_i$  udává hodnotu i-tého hodnocení ( $GS$  – stupeň šedé stupnice),  $n$  je počet hodnocení. Pro hodnocení na úrovni jednoho pozorovatele je  $n=5$ . Pro soubor všech pozorovatelů je  $n=14$ , pro skupinu superior je  $n=5$ , pro skupinu average je  $n=9$ .

Rovnice (43) je použita i pro výpočet robustního průměru, kdy jsou z výpočtu odstraněny vybočující hodnoty, tj. nejvyšší a nejnižší stupeň šedé stupnice udané pozorovatelem. Tyto hodnoty mohou například souviset s únavou pozorovatele, s učením pozorovatele provádět test.

*Vizuálně vnímaná barevná odchylka* je definovaná

$$dV = -1,078 + 23,56e^{-GS/1,709} \quad (44)$$

kde  $GS$  udává hodnotu stupně šedé stupnice udané pozorovatelem.

Výpočet robustní průměrné vizuální odchylky je proveden pomocí rovnice (43) upravené pro výpočet robustního průměru, avšak jsou odstraněny vybočující hodnoty, tj. nejvyšší a nejnižší hodnota vizuálně vnímané odchylky vypočtené podle rovnice (44).

*Výběrová směrodatná odchylka* je definována

$$s = \sqrt{\frac{\sum_1^n (dV_x - dV_{rpx})^2}{(n-1)}} \quad (45)$$

kde  $dV_x$  je vizuálně vnímaná barevná odchylka pro 1 vzorek při 1 hodnocení,  $dV_{rpx}$  je robustní průměrná vizuálně vnímaná barevná odchylka pro 1 vzorek.

- 7) Při vyhodnocování na úrovni pozorovatele byly zjišťovány hodnoty korelačního koeficientu, hodnoty  $PF/3$  faktoru a hodnoty  $STRESS$ .

*Korelační koeficient  $r$  je definován*

$$r(dV_x, dV_{rp}) = \frac{\sum_1^{96} (dV_x - \overline{dV_x})(dV_{rpx} - \overline{dV_{rp}})}{\sqrt{\sum_1^{96} (dV_x - \overline{dV_x})^2 \sum_1^{96} (dV_{rpx} - \overline{dV_{rp}})^2}} \quad (46)$$

kde  $dV_x$  je vizuálně vnímaná barevná odchylka pro 1 vzorek při 1 hodnocení,  $\overline{dV_x}$  je průměrná vizuálně vnímaná barevná odchylka pro všechny vzorky při 1 hodnocení,  $dV_{rpx}$  je robustní průměrná vizuálně vnímaná barevná odchylka pro 1 vzorek,  $\overline{dV_{rp}}$  je průměrná robustní průměrná vizuálně vnímaná barevná odchylka vypočítaná ze všech hodnocených vzorků.

Hodnota korelačního koeficientu udává korelaci vůči měření, tj. čím vyšší je hodnota korelačního koeficientu, tím shoda mezi měřeními vyšší.

*Performance factor (PF/3 faktor)* je index navržený Guanem a Luoem [74] zahrnující míru variability  $CV$  a parametr  $\gamma$ . Čím nižší je jeho hodnota, tím vyšší je shoda mezi hodnoceními.

*PF/3 faktor je definován*

$$PF/3 = \frac{100}{3} \cdot \left( \gamma + V_{AB} + \frac{CV}{100} - r \right) \quad (47)$$

kde

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^{96} (dV_x - f dV_{rpx})^2}}{\overline{dV_x}} \cdot 100$$

$$f = \frac{\sum_1^{96} dV_x dV_{rpx}}{\sum_1^{96} dV_{rpx}^2} = F_3$$

$$\log(\gamma) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^{96} \left[ \log\left(\frac{dV_x}{dV_{rpx}}\right) - \log\left(\overline{\frac{dV_x}{dV_{rpx}}}\right) \right]^2}$$

$$V_{AB} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^{96} \frac{[dV_x - (F dV_{rpx})]^2}{dV_x F dV_{rpx}}}$$

$$F = \sqrt{\frac{\sum_1^{96} \frac{dV_x}{dV_{rpx}}}{\sum_1^{96} \frac{dV_{rpx}}{dV_x}}}$$

kde  $dV_x$  je vizuálně vnímaná barevná odchylka pro 1 vzorek při 1 hodnocení,  $\overline{dV_x}$  je průměrná vizuálně vnímaná barevná odchylka pro všechny vzorky při 1 hodnocení,  $dV_{rpx}$  je robustní průměrná vizuálně vnímaná barevná odchylka pro 1 vzorek,  $\overline{dV_{rp}}$  je průměrná robustní průměrná vizuálně vnímaná barevná odchylka vypočítaná ze všech hodnocených vzorků,  $r$  je korelační koeficient,  $N$  je počet hodnocených párů.

*STRESS* (standardizovaný residuální součet čtverců) udává shodu/neshodu mezi hodnoceními. Tzn., že čím nižší je hodnota *STRESS*, tím je shoda mezi hodnoceními lepší. [74]

*STRESS* je definován

$$STRESS = 100 \sqrt{\frac{\sum_1^{96} (dV_x - F_3 dV_{rpx})^2}{\sum_1^{96} dV_x^2}} \quad (48)$$

kde  $dV_x$  je vizuálně vnímaná barevná odchylka pro 1 vzorek při 1 hodnocení,  $dV_{rpx}$  je robustní průměrná vizuálně vnímaná barevná odchylka pro 1 vzorek. Hodnoty  $F_3$  je použita z předchozí rovnice (47).

- 8) Po získání těchto hodnot byly robustní průměry všech pozorovatelů zkopírovány do dalšího souboru společně vždy pro jednu intenzitu osvětlení, kde byly získány hodnoty jako v bodech 6 a 7 tohoto postupu v rámci všech pozorovatelů, v rámci skupiny superior, v rámci skupin average a samostatně pro pozorovatele číslo 14.



- 9) Robustní průměrné vizuální odchylky ( $dV_{rp}$ ) byly společně se směrodatnými odchylkami přeneseny na základě rozdělení jednotlivých pozorovatelů do skupin podle FM 10 testu do souboru, kde byly vyneseny do grafů. Grafy jsou zpracovány pro každý vzorek zvlášť a pro vzorky po skupinách podle  $\Delta E$ .
- 10) Hodnoty  $dV_{rp}$  jsou proloženy lineární lomenou regresí (lineární regresí po částech). Hodnoty regresních rovnic byly vypočteny v programu *Statistica 12*. Vstupními hodnotami pro výpočet pomocí *Quasi-Newtonova odhadu* byly intenzity osvětlení podle **tabulky č. 2** a hodnoty  $dV_{rp}$  pro jednotlivé vzorky ve skupinách podle standardů. Získané hodnoty pro rovnice byly konstanty a směrnice rovnic a tzv. *breaking point* (bod zlomu).

*Obecná rovnice lineární regrese*

$$y = a + bx \quad (49)$$

kde  $b$  je směrnice přímky, udává sklon přímky,  $a$  je konstanta, udává posun na ose  $y$ .

- 11) Hodnoty konstant a směrnice byly dále použity pro výpočet průběhu rovnic regrese, kterými byly prokládány hodnoty  $dV_{rp}$ . Hodnotami  $x$  pro rovnice regresí byly intenzity osvětlení mezi 1500 a 0,1 luxy v krocích 50 luxů mezi 1500 až 50 luxy, v krocích 1 lux mezi 49 až 1 luxy a v krocích 0,1 lux mezi 1 až 0,1 luxy.
- 12) Hodnoty intenzity osvětlení byly pro výpočet a lepší orientaci v grafu převedeny na stupnici o základu přirozeného logaritmu.
- 13) Všechny hodnoty byly zaokrouhleny na jedno desetinné místo s ohledem na použitou stupnici šedi, která užívá půl stupně a je přijata CIE. Převodem stupnice na logaritmickou byl splněn Weberův-Fechnerův zákon, který udává závislost intenzity smyslového vjemu na intenzitě fyzikálního podnětu.

### 6.3.4. Výsledky a diskuze

Celkem bylo provedeno 47 040 individuálních hodnocení pozorovateli, tj. jeden pozorovatel provedl 3 360 hodnocení.

Hodnoty robustních průměrů,  $dV$  a  $dV_{rp}$  pro jednotlivé pozorovatele jsou uvedeny v **příloze P4 v souboru pechova\_marcela\_prilohaP4**.

Hodnoty  $dV_{rp}$  a hodnoty směrodatných odchylek pro všechny pozorovatele jsou uvedeny v **tabulce č. 11 v příloze P3**. Hodnoty  $dV_{rp}$  a hodnoty směrodatných odchylek pro skupiny superior, average a pozorovatele č. 14 jsou uvedeny v **příloze P4 v souboru pechova\_marcela\_prilohaP4\_2**. V **tabulce č. 12 v příloze P3** jsou uvedeny hodnoty korelačního koeficientu, hodnoty  $PF/3$  faktoru a hodnoty  $STRESS$  pro jednotlivé pozorovatele. Hodnoty korelačního koeficientu, hodnoty  $PF/3$  a hodnoty  $STRESS$  pro všechny pozorovatele, pro pozorovatele superior a average a pozorovatele č. 14 jsou uvedeny v **příloze P4 v souboru pechova\_marcela\_prilohaP4\_3**.

Žádný z vybraných pozorovatelů neměl větší zkušenosti s vizuálním hodnocením vzorků. Na základě toho bylo stanoveno 5 opakování hodnocení, z něhož byla pomocí robustního průměru odstraněna vybočující hodnocení, tj. ta hodnocení, která měla nejvyšší a nejnižší hodnotu udávaného stupně šedi pomocí šedé stupnice. 5 hodnocení je minimálním počtem opakování proto, že po odstranění nejnižší a nejvyšší vybočující hodnoty zůstávají pro další vyhodnocování 3 hodnoty. Ve světě je však možné setkat se pouze 3násobným hodnocením, tj. v případě, že jsou odstraněny dvě nejvyšší hodnoty, zůstává k hodnocení pouze jedna jediná hodnota, která je velmi málo vypovídající. Vybrané hodnocení bylo zvoleno na základě dlouhodobých měření a hodnocení laboratoře LCAM.

Při hodnocení barevných rozdílů se mohou používat masky, které umožňují odstranit rušivé elementy pozadí, na kterém jsou umístěny vzorky, tedy spojení vzorků s pozadím koloristické skříně. Hodnocení s maskou vyzkoušelo 5 pozorovatelů (pozorovatelé č. 1, 5, 7, 8 a 15). Na základě jejich pocitů s hodnocením s maskou a bez masky bylo rozhodnuto masku během dalšího hodnocení vzorků nepoužívat. Při porovnání hodnocení s maskou a bez masky nebyl patrný žádný rozdíl.

Výsledkem hodnocení barevných vzorků pozorovateli byly získané stupně šedé stupnice (**příloha P4\_5**), které každý pozorovatel udával během hodnocení. Protože se jednalo o hodnocení subjektivní, individuální, každý pozorovatel hodnotil jinak. Na základě použitých intenzit osvětlení se posouvala i hodnota nejvyššího udávaného stupně šedé stupnice společně s klesající intenzitou osvětlení. Je vhodné poznamenat, že není důležité, jaký stupeň šedé stupnice daný pozorovatel udává na jaké intenzitě osvětlení, ale je důležité, do jaké míry je nebo není schopen opakovat hodnocení barevných vzorků. Jedním z dalších faktorů, který mohl ovlivnit hodnocení pozorovatelů, byla fyzická a psychická pohoda a denní doba, kdy hodnocení probíhalo,

ale také přístup samotného pozorovatele k hodnocení. U všech pozorovatelů bylo dbáno na to, aby mezi jednotlivými hodnoceními byl dostatečný časový rozestup nejen na regeneraci zraku, ale také aby pozorovatel hodnotil v přibližně stejné denní době všechna hodnocení.

Společně s klesající intenzitou osvětlení pozorovatelé zaznamenali i fakt, že se měnil rozsah šedé stupnice, tj. že při vyšší intenzitě osvětlení používali pozorovatelé rozsah celé stupnice, u nižších hodnot intenzit osvětlení (poslední 3) se rozsah používané stupnice šedi postupně zmenšoval na rozsah 1,5 až 3,5, resp. 4, ale neplatilo to pro všechny pozorovatele. Někteří z pozorovatelů (tj. pozorovatel č. 7, 9, 16) užívali i při velmi nízkém osvětlení (0,39 lux) na hranici mezopické a skotopické oblasti hodnoty šedé stupnice 4 a 4,5. Například pozorovatel č. 1 vyhodnocoval při nejnižší intenzitě osvětlení všechny barevné vzorky počínaje od standardu 5STD konče posledním standardem 16STD hodnotu stupeň 3,5, protože nedokázal rozpoznat znatelné rozdíly mezi jednotlivými vzorky a standardy.

### ***Vyhodnocení vybraných charakteristik***

V rámci vyhodnocení každého pozorovatele samostatně (**tabulka č. 12**) má nejvyšší korelaci vůči měření při nejvyšší intenzitě osvětlení pozorovatel č. 3, nejnižší naopak pozorovatel č. 15. U pozorovatele č. 3 tomu odpovídá i nejnižší hodnota *STRESS* (20,82) ze všech pozorovatelů. Na ostatních intenzitách nelze jednoznačně určit nejlepšího pozorovatele, protože se pozorovatelé mezi sebou střídají.

Pozorovatel č. 15 stojí za pozornost z toho důvodu, že se jedná o pozorovatele ze skupiny superior. Tento pozorovatel má na prvních 5 intenzitách osvětlení nejnižší hodnotu korelačního koeficientu ze všech pozorovatelů v rámci samostatného vyhodnocení pozorovatele, zároveň se jedná o pozorovatele, který má nejnižší korelační koeficient v rámci všech pozorovatelů. V samostatném vyhodnocení se řadí k pozorovatelům s nižší hodnotou faktoru i hodnotou *STRESS*. Při porovnávání v rámci všech pozorovatelů zaujímá místo pozorovatele s nejnižší hodnotou korelačního koeficientu, zároveň tomu odpovídá i u prvních 4 intenzit osvětlení i vysoká hodnota *STRESS* (o polovinu vyšší než průměrná hodnota všech pozorovatelů), značí to tedy pozorovatele s nízkou shodou mezi hodnoceními. Avšak u zbylých 3 intenzit osvětlení se tento pozorovatel řadí mezi průměrné pozorovatele. Stejná situace se opakuje i při porovnání v rámci skupiny superior.

Naproti tomu pozorovatel č. 14, který je vyhodnocován samostatně na základě korekce a vysokého TES se v rámci samostatného vyhodnocení pozorovatele svými výsledky příliš neliší od ostatních pozorovatelů. Jediným ukazatelem, že by mohlo jít o pozorovatele mimo jinak konzistentní skupinu pozorovatelů, je vyšší hodnota  $PF/3$  faktoru (prvních 5 intenzit osvětlení u samostatného vyhodnocení a první 4 intenzity osvětlení u vyhodnocení všech pozorovatelů), avšak na ostatních intenzitách osvětlení se tato hodnota faktoru neliší od ostatních hodnot faktorů pozorovatelů.

Na základě vyhodnocení všech pozorovatelů samostatně, v rámci všech pozorovatelů a v samostatných skupinách lze skupinu pozorovatelů a tedy všechny pozorovatele označit za konzistentní, tj. že jejich hodnocení se nijak výrazně neliší od průměru. Výjimku pak tvoří výše jmenovaní pozorovatelé č. 14 a č. 15.

Průměrná hodnota korelačního koeficientu ani v jednom případě (všichni pozorovatelé, skupina superior a average, pozorovatel č. 14) neklesá pod hodnotu 0,87. Což potvrzuje ten fakt, že se jedná o vyváženou skupinu pozorovatelů.

Na závěr je potřeba poznamenat, že se snižující se intenzitou osvětlení se snižují hodnoty faktoru  $PF/3$  a hodnoty  $STRESS$ , tj. že pozorovatelé mají vyšší shodu mezi jednotlivými hodnoceními a mezi sebou vzhledem k tomu, že používají menší rozsah šedé stupnice a také proto, že při velmi nízkých hodnotách intenzitách osvětlení bylo pro všechny pozorovatele těžké rozpoznat znatelnější rozdíl především u vzorků z druhé poloviny sady.

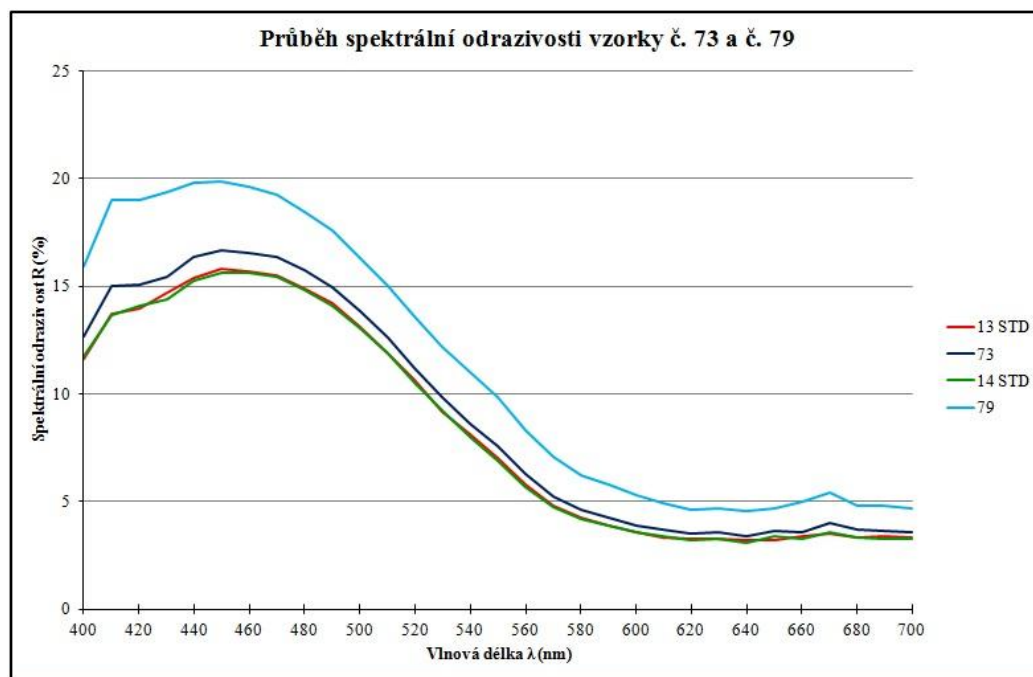
### ***Hodnocení závislosti robustní průměrné vizuální odchylky na intenzitě osvětlení***

Užitím Quasi-Newtonova odhadu byly získány dvě lineární rovnice a bod zlomu. Tento bod poukazuje na intenzitu osvětlení, při které dochází k přechodu z tzv. správného rozlišování vzorků na nesprávné rozlišování vzorků. Protože každý pozorovatel hodnotil vzorky individuálně a jedná se o subjektivní hodnocení, odpovídají tomu i jednotlivé hodnoty směrodatných odchylek pro vizuální odchylky.

Pro přehlednost (celkový počet grafů je 448, pro každý vzorek je vytvořen samostatný graf vzhledem k množství dat pro jeden vzorek) jsou zde uvedeny grafy pro vzorek č. 73 s rozdílem  $\Delta E = 1$  a vzorek č. 79 s rozdílem  $\Delta E = 5$  pro všechny pozorovatele, pro skupinu superior a average a pro pozorovatele č. 14. Pro ostatní vzorky jsou grafy uvedeny na v **příloze P5 ve složce grafy**. Vstupní hodnoty pro tyto grafy jsou v **příloze P3 v tabulce č. 11** a v **příloze P4 v souboru pechova\_marcela\_prilohaP4\_4**. V neposlední řadě se nachází v **příloze P4** v souboru

**pechova\_marcela\_prilohaP4\_5** pozorovateli udávané stupně šedi získané při vizuálním hodnocení.

Na **obrázku č. 42** je zobrazen průběh spektrální odrazivosti vzorků č. 73 a č. 79 společně s odrazivostí jim náležících standardů.



**Obrázek č. 42** – *Spektrální odrazivost vzorků a standardů*

Barevné souřadnice těchto vzorků jsou uvedeny v **příloze č. P1** v **tabulce č. 9**.

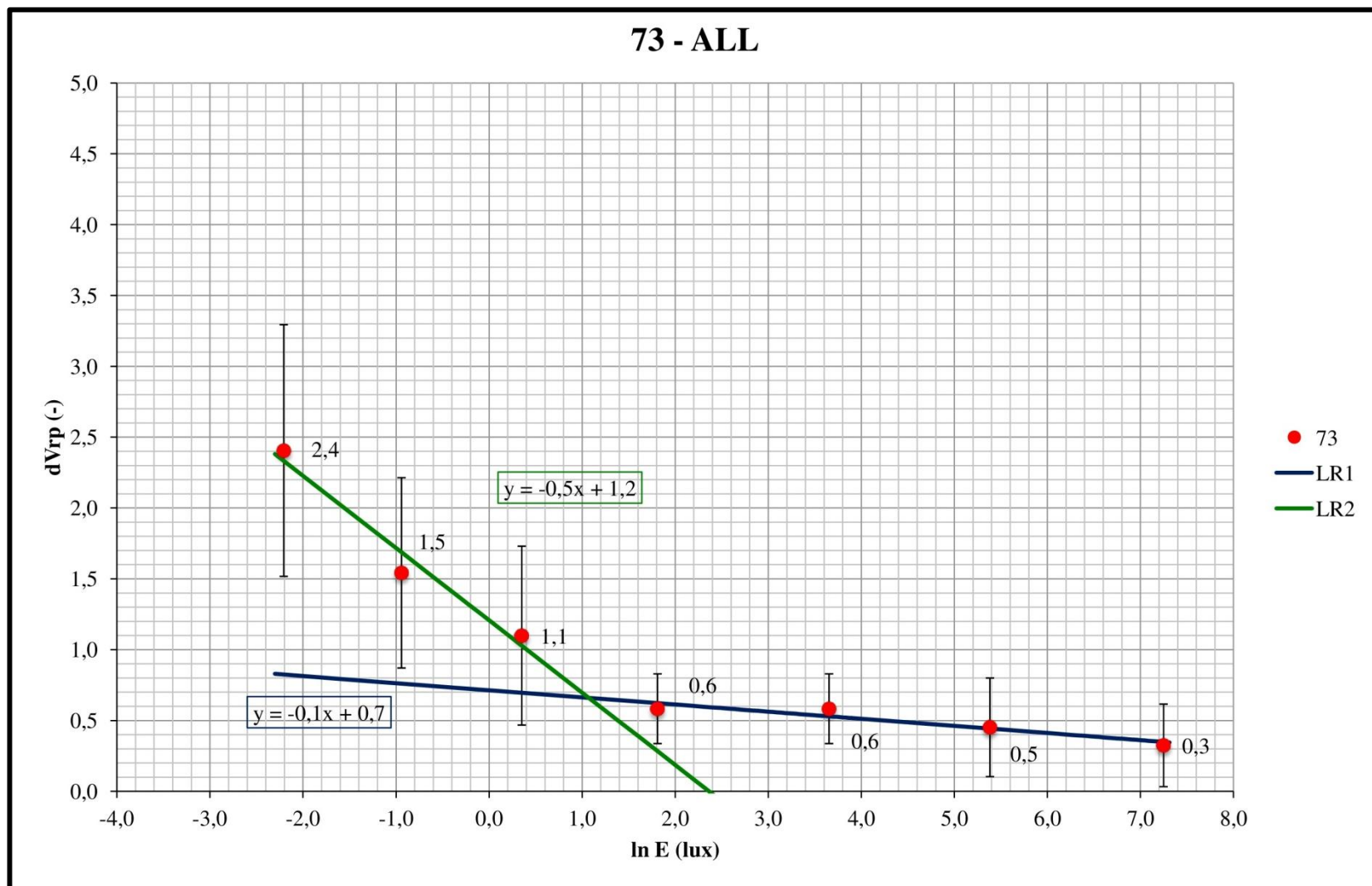


**Obrázek č. 43** – Barevné vzorky a standardy

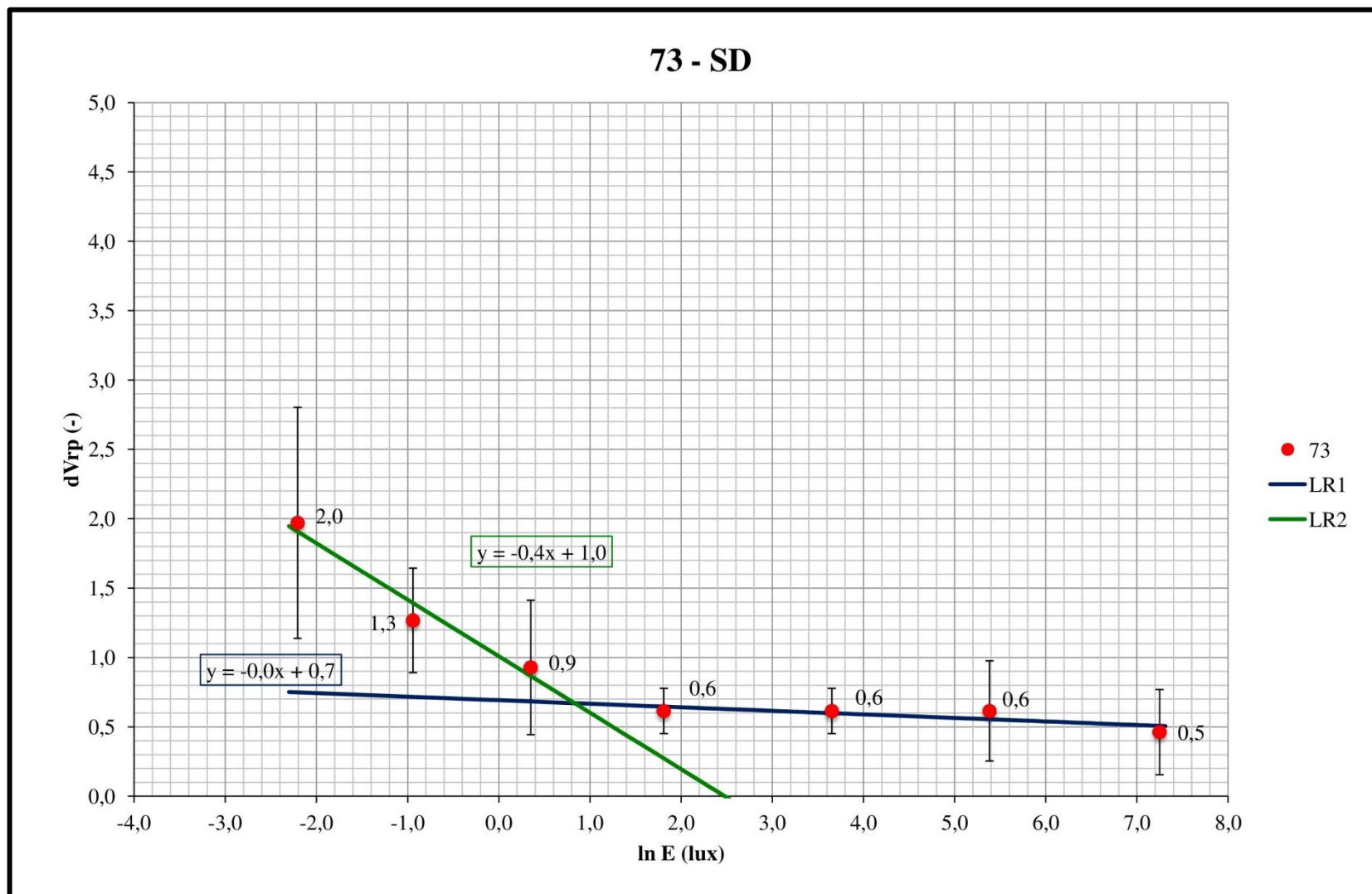
V **tabulce č. 8** jsou vypsány hodnoty bodu zlomu pro vybrané vzorky. Body zlomu pro ostatní vzorky a skupiny jsou uvedeny v **příloze P4** v souboru **pechova\_marcela\_prilohaP4\_4**.

**Tabulka č. 8** – Bod zlomu

Skupina	Číslo vzorku	Bod zlomu v ln E stupnici (lux)	
		73	79
ALL		1	1,4
SD		0,9	1,6
AD		1,1	1,2
14		0,9	1

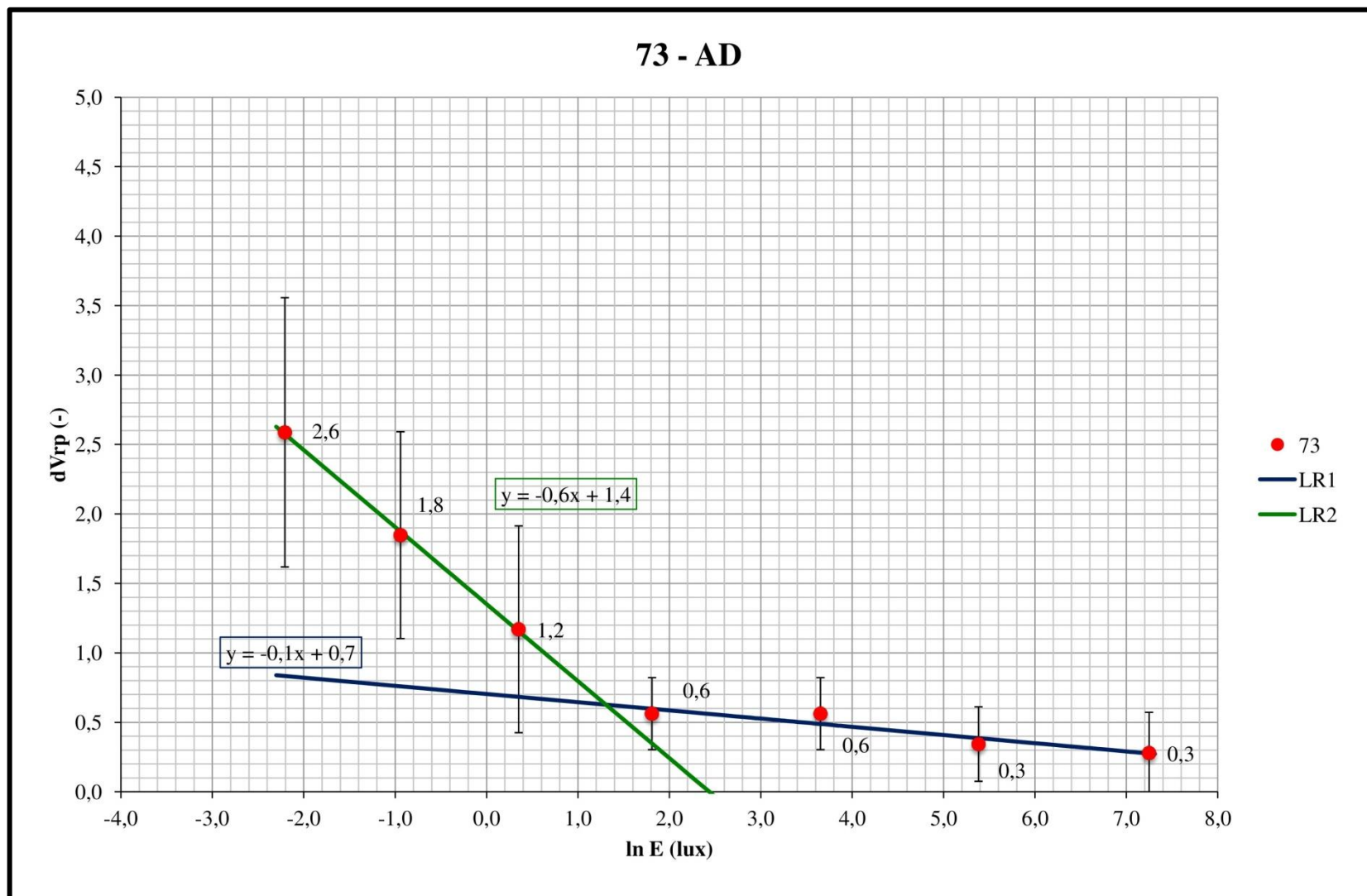


Obrázek č. 44 – Graf vzorku č. 73 pro všechny pozorovatele

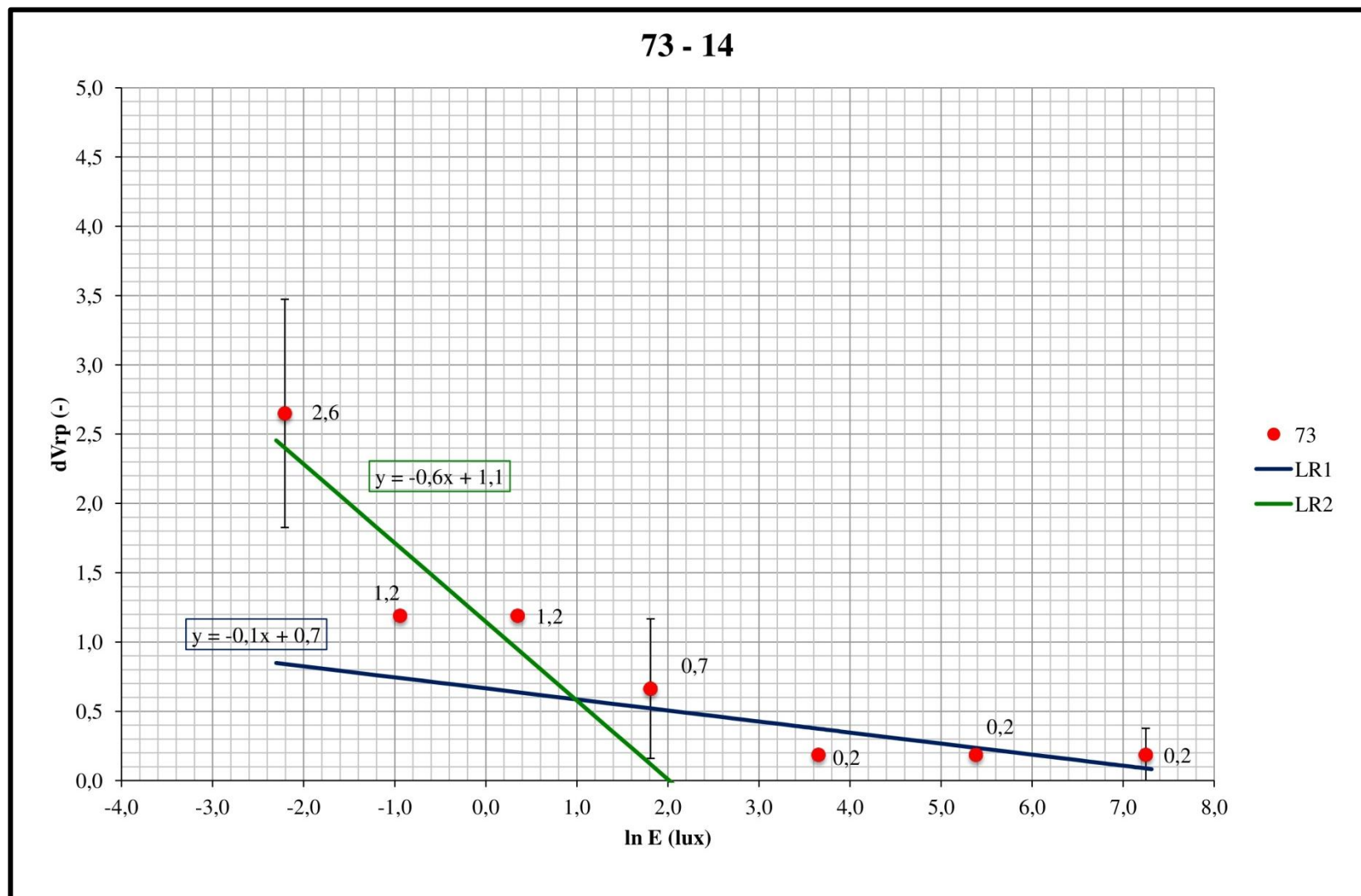


Obrázek č. 45 – Graf vzorku č. 73 pro skupinu superior

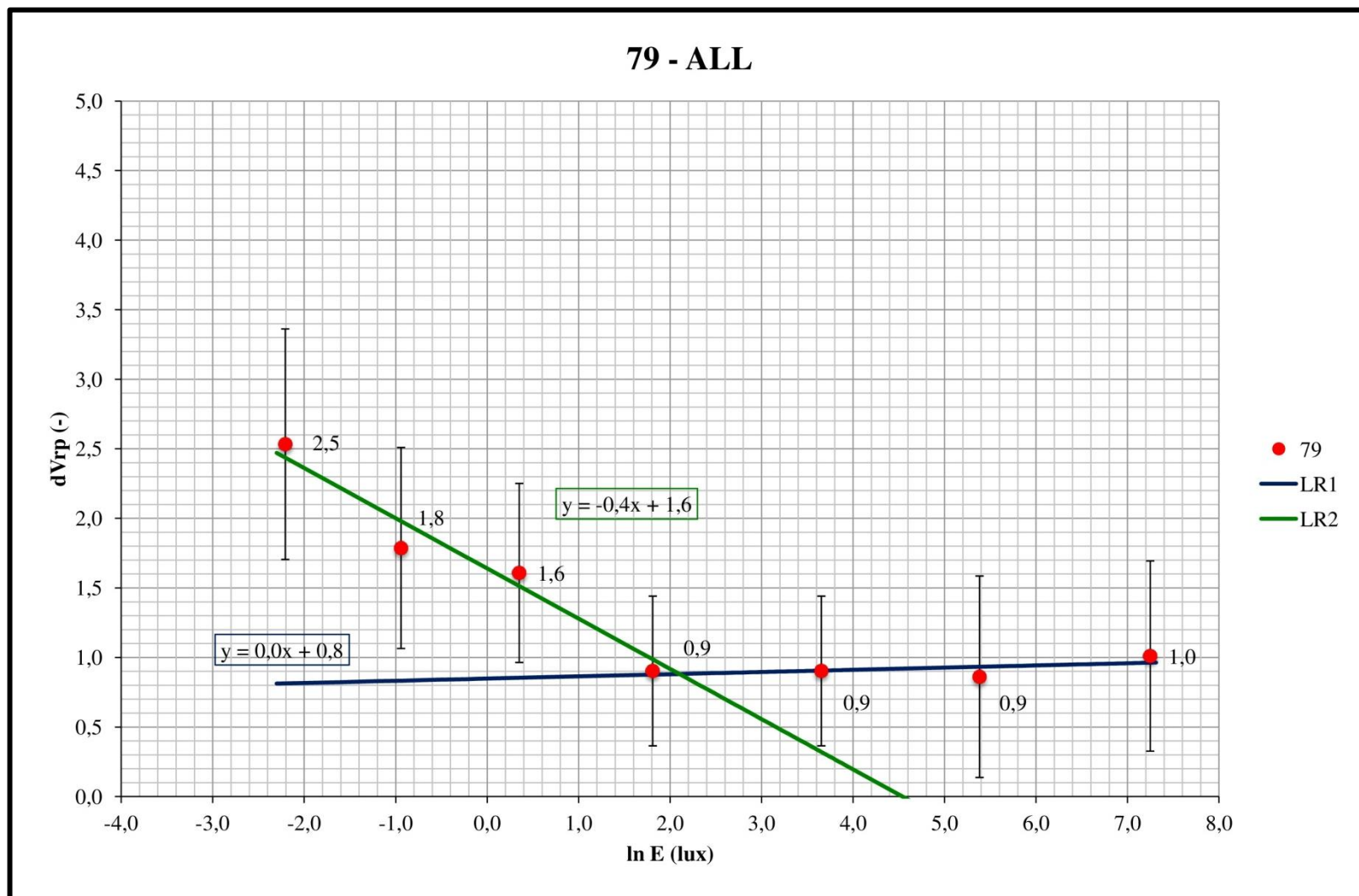




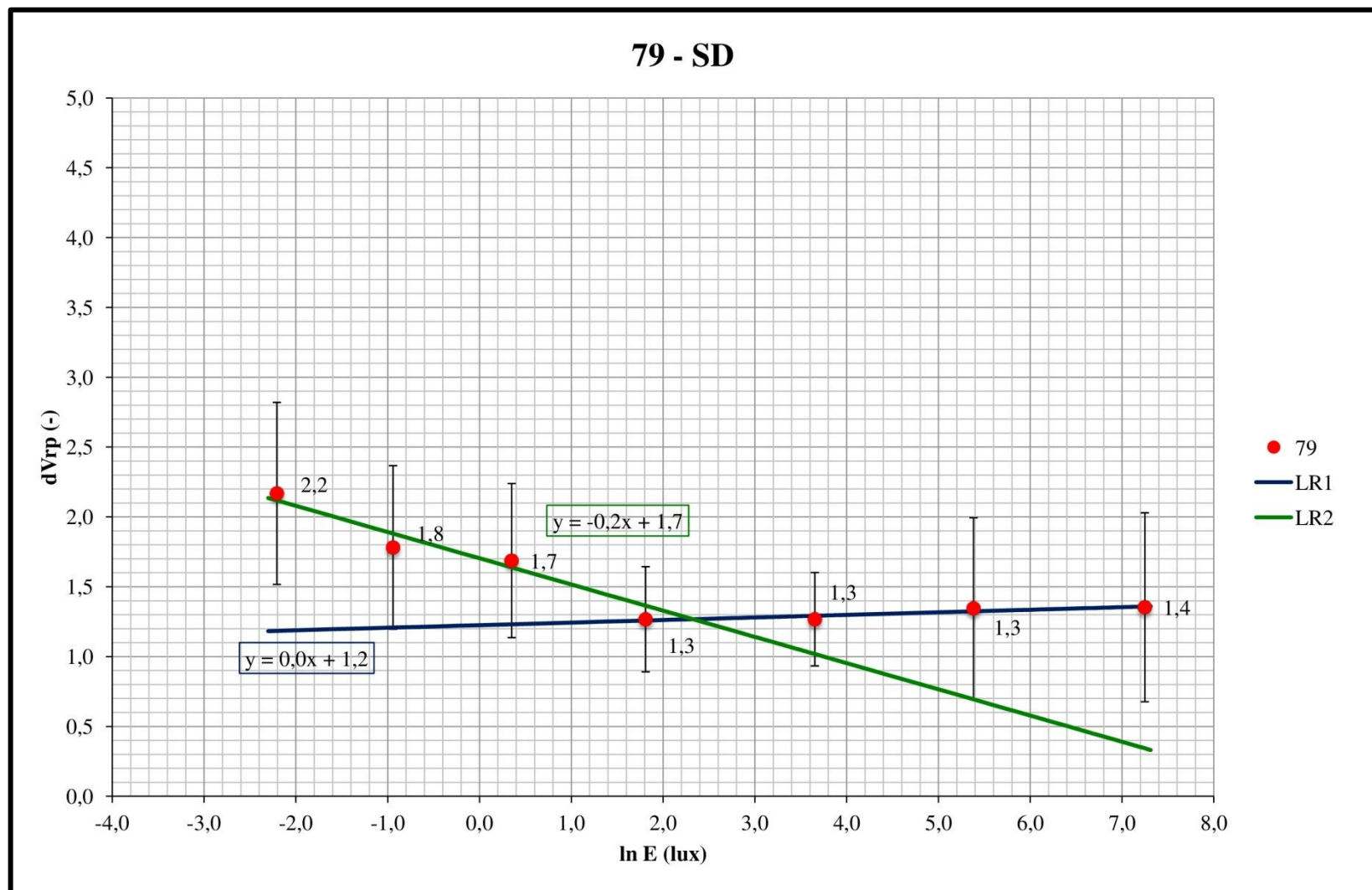
**Obrázek č. 46** – Graf vzorku č. 73 pro skupinu average



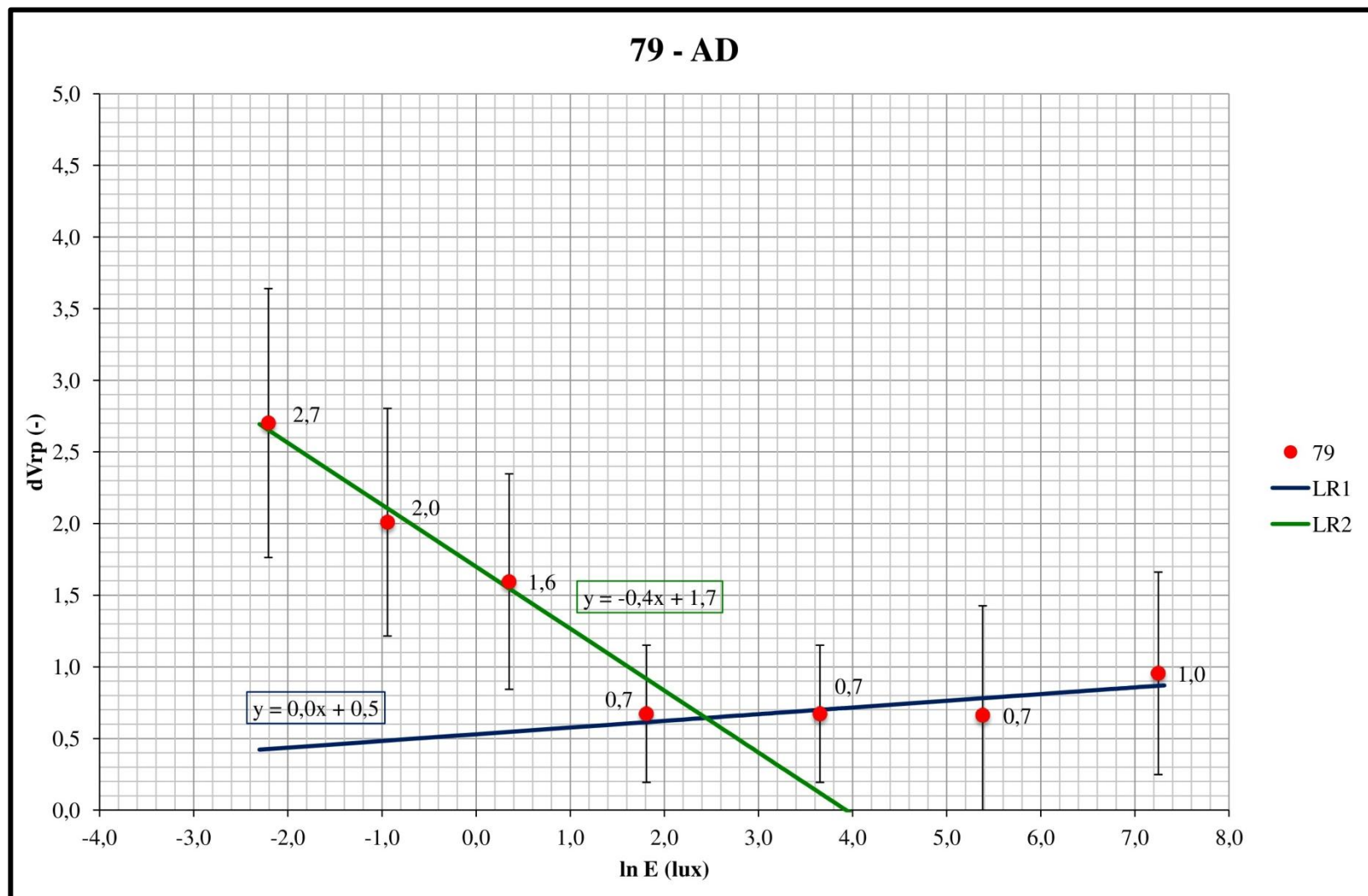
Obrázek č. 47 – Graf vzorku č. 73 pro pozorovatele č. 14



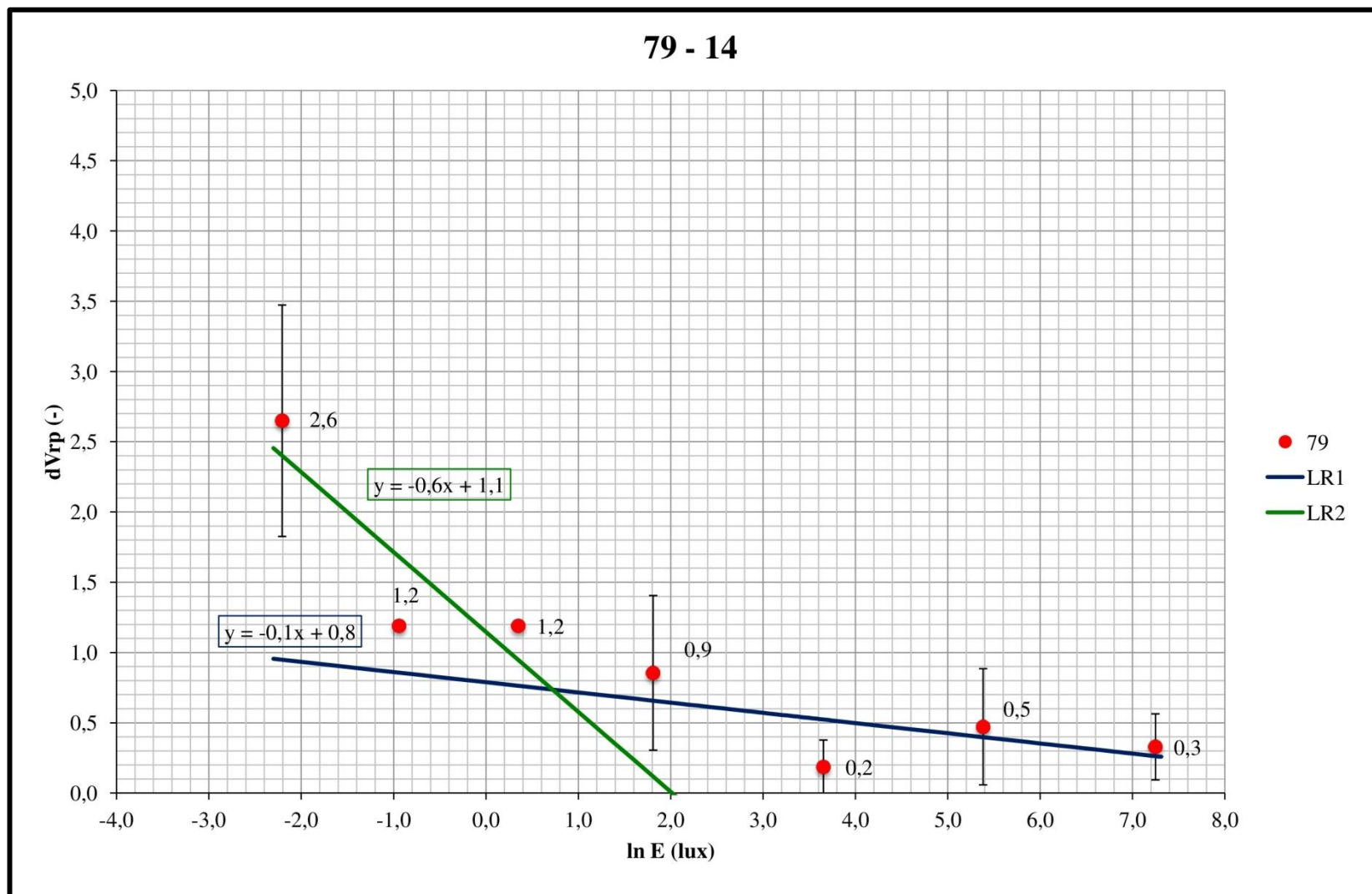
Obrázek č. 48 – Graf vzorku č. 79 pro všechny pozorovatele



Obrázek č. 49 – Graf vzorku č. 79 pro skupinu superior



Obrázek č. 50 – Graf vzorku č. 79 pro skupinu average



Obrázek č. 51 – Graf vzorku č. 79 pro pozorovatele č. 14

Tyto dva vybrané vzorky jsou vyhodnoceny samostatně, ale i v rámci všech vzorků. Pro samostatné vyhodnocení a ukázkou byly záměrně vybrány vzorky s malým a velkým barevným rozdílem, ale byly také proto, že se jedná o dva vzorky, jejichž standardy mají téměř stejný průběh spektrální odrazivosti (**obrázek č. 42**). Vzorek č. 73 náleží standardu 13 STD, jehož průběh spektrální odrazivosti se téměř shoduje se standardem 14 STD, jemuž přináleží vzorek č. 79. Vzorky se od sebe liší počtem jednotek světlosti ( $L^*$ ), ale i v souřadnicích  $a^*$  (červeno-zelená osa) a  $b^*$  (žluto-modrá osa), avšak ne příliš výrazně jako například vzorek č. 73 a č. 1. Jak už bylo napsáno výše, jedná se o vzorky s rozdílem 1 a 5 jednotek od standardu. Blížkost standardů potvrzují i téměř totožné barevné souřadnice (**tabulce č. 9**).

Hodnota robustní průměrné vizuální odchylky ( $dV_{rp}$ ) roste pro vzorek č. 73 (**obrázek č. 44–47**) přibližně lineárně (**příloha P4\_4**) do hodnoty  $dV_{rp}$  při hodnotě osvětlení 1 lux, od které pak hodnota  $dV_{rp}$  narůstá skokově, i když je zde zachována linearita skoku. Bod zlomu pro skupinu všech pozorovatelů (all) je roven 1 luxu, což odpovídá mezopické oblasti úrovně intenzity osvětlení. S hodnotou  $dV_{rp}$  roste i hodnota směrodatné odchylky jednotlivých hodnot  $dV_{rp}$  na různých intenzitách osvětlení. Za povšimnutí mimo jiné také stojí to, že při nižších intenzitách osvětlení jsou hodnoty směrodatných výrazně větší než pro vyšší intenzity osvětlení, což je v rozporu s nízkými hodnotami *STRESS* a *PF/3* faktoru popsány výše. Vysvětlením tohoto faktu je, že jednotlivá subjektivní hodnocení jsou stanovena s experimentální chybou u daného pozorovatele, tato experimentální chyba je vyjádřena velikostí směrodatných odchylek na jednotlivých intenzitách osvětlení pro jednotlivé vzorky. Navíc tyto charakteristiky nehodnotí celou skupinu, ale pozorovatele v rámci skupiny. Porovnáním grafů pro vzorek č. 73 pro všechny pozorovatele, superior a average pozorovatele a pozorovatele č. 14 je průběh těchto grafů podobný s tím rozdílem, že se liší hodnota  $dV_{rp}$ , tj.  $dV_{rp}$  se posouvají po ose y. Přičemž hodnota  $dV_{rp}$  pro skupinu superior je menší pouze při nižších intenzitách pod 1 lux zároveň jsou nižší i směrodatné odchylky. Při intenzitě osvětlení nad 1 lux jsou naopak hodnoty  $dV_{rp}$  nižší pro skupinu všech pozorovatelů.

Hodnota bodu zlomu pro ostatní skupiny pozorovatelů (**tabulka č. 8**) se pohybuje jako hodnota bodu zlomu pro všechny pozorovatele okolo 1 lux, tj. stále mezopická úroveň intenzity osvětlení.



U porovnávaných grafů pro vzorek č. 79 je vidět jistý trend podobný grafům vzorků č. 79, avšak velikost  $dV_{rp}$  zde střídavě narůstá a klesá a s ní i velikost jednotlivých směrodatných odchylek. Na rozdíl od předchozího vzorku zde není patrný přechod mezi fotopickou a mezopickou úrovní osvětlení, resp. bodem, kde dochází ke zvětšení rozptylu hodnocení skupin pozorovatelů.

### ***Hodnocení vzorků s malým barevným rozdílem***

Pro všechny vzorky s malým barevným rozdílem platí, že pozorovatelé korektně rozlišují barevné rozdíly ještě při intenzitě osvětlení 1 lux. Zde se vytváří ostrá hranice, která se projevuje zvětšením rozptylu v hodnocení skupin pozorovatelů pod intenzitou nižší než je 1 lux. Nezávislým experimentem tak byly potvrzeny výsledky *LRC* (*Lighting research center*), které užitím vážených funkcí ukazují, jasný přechod fotopické a skotopické fáze, ale zároveň byl potvrzen fakt, že i v mezopické úrovni intenzity osvětlení stále ovlivňuje pozorovatelovo hodnocení fotopická citlivost oka, dále také ukazují ostré hranice mezi úrovněmi intenzity osvětlení (tj. pro  $0,1 \text{ cd/m}^2$  je hodnota LRC 0,28, pro  $1 \text{ cd/m}^2$  je hodnota LRC 1). Oproti tomu tomu *MOVE* (*Mesopic Optimisation of Visual Efficiency*) pro vyjádření mezopické funkce postupné škálování (tj. pro  $0,1 \text{ cd/m}^2$  je hodnota MOVE 0,42, pro  $1 \text{ cd/m}^2$  je hodnota MOVE 0,7). Potvrzení výsledků LRC bylo provedeno pomocí rovnice (4).

Totéž platí i pro vyhodnocení v rámci skupin average, superior a pozorovatele č. 14.

### ***Hodnocení vzorků s velkým barevným rozdílem***

U vzorků s velkým barevným rozdílem není hranice rozlišení viditelná, jako je tomu u vzorků s malým barevným rozdílem, protože rozptyl hodnocení pozorovatelů je velký. Hodnoty směrodatných odchylek jsou vyšší pro vzorky s větším barevným rozdílem oproti vzorkům s malým barevným rozdílem. Pro světlé barevné vzorky s velkým barevným rozdílem se vypočítaný bod zlomu pohybuje okolo 2,5–7,3 luxy, v rámci jednotlivých skupin dokonce přesahuje hodnotu nejvyšší intenzity osvětlení. U těchto vzorků je tedy hranice přechodu k hodnocení s větším rozptylem nerozlišitelná.



## 7. Závěr

Cílem diplomové práce na téma Vliv intenzity osvětlení malých barevných rozdílů bylo individuální hodnocení sady barevných vzorků skupinou pozorovatelů při různých intenzitách osvětlení a vyhodnocení validity vizuální odchylky na fotopické a mezopické úrovni osvětlení. Skotopické úrovně osvětlení nebylo použitými filtry dosaženo.

Před samotným individuálním hodnocením byly barevné standardy a k nim příslušné barevné vzorky změřeny remisním spektrofotometrem. Ze získaných barevných souřadnic byly vypočítány barevné rozdíly vyjádřené pomocí vybraných rovnic CIELAB, CMC(1:1), CMC(2:1) a CIEDE2000. Po dokončení individuálního hodnocení barevných vzorků byla vyhodnocena predikční schopnost rovnic porovnáním těchto rovnic s robustní průměrnou vizuální odchylkou. Vyjádření predikční schopnosti rovnic bylo vyhodnoceno pomocí hodnoty STRESS. Nejvyšší predikční schopnosti (nejvyšší vypovídající hodnoty) dosáhla rovnice CIEDE2000 pro prvních 5 intenzit osvětlení, pro zbylé intenzity osvětlení to byla rovnice CMC(1:1). Nejnižší predikční schopnost měla mimo poslední intenzity osvětlení rovnice CIELAB.

Celkem na 7 různých intenzitách osvětlení, kterých bylo dosaženo kombinací neutrálních filtrů s nanesenými autofoliemi, bylo provedeno individuální hodnocení barevných vzorků skupinou pozorovatelů pomocí šedé stupnice. Jednotlivé intenzity osvětlení se pohybovaly od fotopické úrovně intenzity osvětlení až k dolní hranici mezopické úrovně osvětlení. Hodnocení se zúčastnilo 14 pozorovatelů. Ze získaných dat byl zpracován robustní průměr a robustní průměrná vizuální odchylka. Závislost této vizuální odchylky byla interpretována v grafech závislosti robustní průměrné vizuální odchylky na intenzitě osvětlení.

Ze zjištěných dat byl nezávisle potvrzen výsledek LRC laboratoře. Tímto výsledkem bylo zjištění, že pro barevné vzorky s malým barevným rozdílem se hodnota bodu zlomu, tedy bodu, kdy se zvyšuje rozptyl v hodnocení pozorovatelů a mezi pozorovateli a zároveň dochází ke skokovému nárůstu velikosti robustní průměrné vizuální odchylky, pohybovala okolo 1 luxu. Na základě výsledků a porovnání s hodnotami LRC laboratoře vyšla skutečnost, že i v mezopické úrovni intenzity osvětlení je pozorovatel stále ovlivněn fotopickou citlivostí oka. U použitých vzorků

s velkým barevným rozdílem je hranice bodu zlomu oproti vzorkům s malým barevným rozdílem nerozlišitelná. Z výsledků hodnocení vyplynulo, že u všech vzorků s velkým barevným rozdílem je velký rozptyl v hodnocení pozorovatelů.

V neposlední řadě je nutné říci, že celá skupina byla při vyhodnocení vybraných charakteristik (korelační koeficient, performance faktor a STRESS) označena jako konzistentní, tj. že se hodnocení jednotlivých pozorovatelů nijak výrazně neliší od průměru. Hodnoty faktoru a hodnoty STRESS se snižující se intenzitou osvětlení snižovaly, znamená to vyšší shodu mezi jednotlivými hodnoceními pozorovatelů, avšak v tomto případě je nutné podotknout, že se snižující se intenzitou osvětlení se snižoval rozsah používané stupnice šedi.

## 8. Seznam literatury a zdrojů

- [1] ČIHÁK, Radomír. *Anatomie 3. 2., upr. a dopl. vyd.* Praha: Grada, 2004, 588 - 589. ISBN 80-247-1132-x.
- [2] KRAUS, Hanuš. *Kompendium očního lékařství*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 1997, s. 341. ISBN 8071690791.
- [3] KONRÁDOVÁ, Václava, Luděk VAJNER a Jiří UHLÍK. *Histologie: přednášky pro bakalářské studium*. Vyd. 1. Jinočany: H&H, 2005, 186 s. ISBN 80-731-9009-5.
- [4] SHEVELL, Steven K. *The science of color*. 2nd ed. United States: Optical Society of America, 2003, ix, 339 p. ISBN 04-445-1251-9.
- [5] FONTANA, Josef, TRNKA, Josef, et al. Zraková systém. *Funkce buněk a lidského těla: Multimediální skripta* [online]. ©2014 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <http://fbt.cz/skripta/xiii-smysly/1-zrakovy-system/>.
- [6] KVAPILÍKOVÁ, Květa. *Anatomie a embryologie oka: učební texty pro oční optiky a oční techniky, optometristy a oftalmology*. 1. vyd. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví v Brně, 2000, 206 s. ISBN 80-701-3313-9.
- [7] Retina Histology 2. a REMINGTON. OPTOMETRY 531. *STUDYBLUE* [online]. ©2014 [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: <https://www.studyblue.com/notes/n/retina-histology-2/deck/10206839>.
- [8] Rods and Cones. REMINGTON. OPTOMETRY 531. *STUDYBLUE* [online]. ©2014 [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: <https://www.studyblue.com/notes/n/retina-histology-2/deck/10206839>.
- [9] From physics to perception. *Interesting ideas interspersed with nonsense* [online]. ©2011 [cit. 2014-12-18]. Dostupné z: [http://nikhil.superfacts.org/archives/2011/07/from\\_physics\\_to.html](http://nikhil.superfacts.org/archives/2011/07/from_physics_to.html).

- [10] MONTAG, Ethan D. Rods & Cones. *Rochester Institute of Technology: Center for Imaging Science*[online]. ©2014 [cit. 2014-11-08]. Dostupné z:[http://www.cis.rit.edu/people/faculty/montag/vandplite/pages/chap\\_9/ch9p1.html](http://www.cis.rit.edu/people/faculty/montag/vandplite/pages/chap_9/ch9p1.html).
- [11] Receptor density. *Image Gallery: Vision and the Eye* [online]. Department of physics: University of Florida, 2013 [cit. 2014-09-20]. Dostupné z: [http://www.phys.ufl.edu/~avery/course/3400/vision/rod\\_cone\\_distribution2.jpg](http://www.phys.ufl.edu/~avery/course/3400/vision/rod_cone_distribution2.jpg).
- [12] Color vision deficiency. *Genetics Home Reference: Your Guide to Understanding Genetic Conditions* [online]. 2006, 2014 [cit. 2014-11-22]. Dostupné z:<http://ghr.nlm.nih.gov/condition/color-vision-deficiency>.
- [13] OPN1SW. *Genetics Home Referenc: Your Guide to Understanding Genetic Conditions*[online]. ©2006, 2014 [cit. 2014-10-31]. Dostupné z: <http://ghr.nlm.nih.gov/gene/OPN1SW>.
- [14] OPN1MW. *Genetics Home Referenc: Your Guide to Understanding Genetic Conditions*[online]. ©2006, 2014 [cit. 2014-10-31]. Dostupné z: <http://ghr.nlm.nih.gov/gene/OPN1MW>.
- [15] OPN1LW. *Genetics Home Referenc: Your Guide to Understanding Genetic Conditions*[online]. ©2006, 2014 [cit. 2014-10-31]. Dostupné z: <http://ghr.nlm.nih.gov/gene/OPN1LW>.
- [16] SHARPE, Ed. by Karl R. Gegenfurtner; Lindsay T. *Color vision: from genes to perception*. Reprint. Cambridge [u.a.]: Cambridge Univ. Press, 2001, s. 3-52. ISBN 052100439x.
- [17] NEITZ, Jay a Maureen NEITZ. *The genetics of normal and defective color vision*. Vision Research. 2011, vol. 51, issue 7, s. 633-651. DOI: 10.1016/j.visres.2010.12.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0042698910005699>.
- [18] BENJAMIN, William J a Irvin M BORISH. *Borish's clinical refraction*. 2nd ed. St. Louis Mo.: Butterworth Heinemann/Elsevier, ©2006, s. 289-346. ISBN 0750675241.

- [19] Foveola: Fig. F9 Cross-section of the retina showing the fovea centralis and foveola (rod-free area). In: *The Free dictionary* [online]. ©2003-2014 [cit. 2014-09-18]. Dostupné z: <http://medical-dictionary.thefreedictionary.com/foveola>.
- [20] MOUREK, Jindřich. *Fyziologie: učebnice pro studenty zdravotnických oborů*. 1. vyd. Praha: Grada, 2005, s. 159-164, ISBN 80-247-1190-7.
- [21] AUTRATA, Rudolf a Jana VANČUROVÁ. *Nauka o zraku*. 1. vyd. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví v Brně, 2002, 226 s. ISBN 80-701-3362-7.
- [22] MIKŠ, Antonín. *Aplikovaná optika*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 230 s. ISBN 978-80-01-04254-0.
- [23] Visual pathway. *Eye Optics* [online]. 2013 [cit. 2015-10-10]. Dostupné z: <http://eyeoptic.wikispaces.com/>
- [24] AMERICAN OPTOMETRIC ASSOCIATION. Color Vision Deficiency. AMERICAN OPTOMETRIC ASSOCIATION. *American Optometric Association* [online]. ©2014. St. Louis [cit. 2014-11-10]. Dostupné z: <http://www.aoa.org/patients-and-public/eye-and-vision-problems/glossary-of-eye-and-vision-conditions/color-deficiency?sso=y>.
- [25] POKORNY, Joel et al. *Procedures for Testing Color Vision: Report of Working Group 41*. Washington, D.C.: National Academy Press, 1981, 128 s. ISBN 0-309-58883-9.
- [26] RICHMOND. Color Vision Deficiency. [online][cit. 2014-11-23] Dostupný z: <http://intranet.opt.uh.edu/resources/courses/opto5320/RichmondColorBook-Final.pdf>.
- [27] JETSU, Tuija. *Modeling color vision*. Joensuu: University of Eastern Finland, 2010, 54, [44] s. Publications of the University of Eastern Finland, no 20. ISBN 978-952-6102-573.
- [28] SIMUNOVIC, M P. Colour vision deficiency. *Eye*. 2009-11-20, vol. 24, issue 5, s. 747-755. DOI: 10.1038/eye.2009.251. Dostupné z: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/eye.2009.251>.

- [29] MELAMUD, Alex, Stephanie HAGSTROM a Elias TRABOULSI. Color vision testing. *Ophthalmic Genetics*. 2004, vol. 25, issue 3, s. 159-187. DOI: 10.1080/13816810490498341. Dostupné z: <http://informahealthcare.com/doi/abs/10.1080/13816810490498341>.
- [30] DEEB, Samir S. *Molecular genetics of colour vision deficiencies*. [online]. [cit. 2014-10-19]. DOI: 10.1111/j.1444-0938.2004.tb05052.x. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1444-0938.2004.tb05052.x/pdf>.
- [31] Colblindor: Monochromacy - Complete Color Blindness. *Color Blindness* [online]. ©2006-2014 [cit. 2014-11-10]. Dostupné z: <http://www.color-blindness.com/2007/07/20/monochromacy-complete-color-blindness/>.
- [32] Total Color Blindness. *Color Blindness* [online]. ©2013 [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://www.colour-blindness.com/variations/total/>.
- [33] Blue Cone Monochromat (BCM). *Achromatopsia.info: Journey through the Light!* [online]. Low Vision Centers of Indiana, ©2013-2014 [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://www.achromatopsia.info/blue-cone-monochromatism/>.
- [34] PENTAO, L. Maternal uniparental isodisomy of chromosome 14: association with autosomal recessive rod monochromacy. *PubMed*. 1992. Dostupné z: <http://www.ihop-net.org/UniPub/iHOP/pm/55411.html?nr=2&pmid=1347967>.
- [35] Congenital Colour Vision Deficiencies. *University of Calgary: Department of Psychology* [online]. ©2014 [cit. 2014-11-19]. Dostupné z: <http://psyc.ucalgary.ca/PACE/VA-Lab/colourperceptionweb/congenital.htm>.
- [36] Coblis — Color Blindness Simulator. *Colblindor* [online]. ©2006-2014 [cit. 2014-11-23]. Dostupné z: <http://www.color-blindness.com/coblis-color-blindness-simulator/>.
- [37] CARROLL, Joseph, Stacey S. CHOI a David R. WILLIAMS. In vivo imaging of the photoreceptor mosaic of a rod monochromat. *Vision Research*. 2008, vol. 48, issue 26, s. 2564-2568. DOI: 10.1016/j.visres.2008.04.006. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S00426989080001922>.

- [38] Helping Your Child with Achromatopsia. WINDSOR. THE LOW VISION CENTERS OF INDIANA. *Achromatopsia.info*[online]. ©2013-2014 [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: <http://www.achromatopsia.info/childrens-vision/>.
- [39] Colblindor. *Colblindor: Protanopia – Red-Green Color Blindness* [online]. ©2006-2014 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://www.color-blindness.com/protanopia-red-green-color-blindness/>.
- [40] Deuteranopia – Red-Green Color Blindness. *Colblindor* [online]. © 2006-2014 [cit. 2014-11-22]. Dostupné z: <http://www.color-blindness.com/deuteranopia-red-green-color-blindness/>.
- [41] Tritanopia – Blue-Yellow Color Blindness. *Colblindor* [online]. ©2006-2014 [cit. 2014-11-22]. Dostupné z: <http://www.color-blindness.com/tritanopia-blue-yellow-color-blindness/>.
- [42] DEEB, Samir S a Arno G MOTULSKY. Red-Green Color Vision Defects. 2005. Dostupné z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK1301/>.
- [43] POKORNY, Joel, SMITH, Viviane C. *Eye disease and color defects*. [online][cit. 2014-11-17] Dostupný z: <http://macboy.uchicago.edu/~eye1/PDF%20files/Eye%20disease%20VR%2086.pdf>.
- [44] PACHECO-CUTILLAS, M., SAHRAIE, A., EDGAR, D. F. *Acquired colour vision defects in glaucoma—their detection and clinical significance*. [online][cit. 2014-11-17] Dostupný z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1722892/pdf/v083p01396.pdf>.
- [45] VELHAGEN, Karl a Dieter BROSCHEMANN. *Tabulky k vyšetření barvocitu*. Překlad Jiří Cendelín. Praha: Aventinum, 1995, 15 s., [24] s. il. ISBN 80-852-7724-7.
- [46] FARNSWORTH, Dean. THE FARNSWORTH-MUNSELL 100-HUE TEST for the examination of Color Discrimination: Manual [online] 2011-2012. [cit. 2013-10-30] Dostupný z: [http://www.qcqa.com/docs/doc2\\_2552.pdf](http://www.qcqa.com/docs/doc2_2552.pdf).

- [47] ATCHISON, George Smith; David. *Optics of the human eye*. 1. publ. Oxford [u.a.]: Butterworth-Heinemann, 2000, ch. 1, ch. 11. ISBN 0750637757.
- [48] MALACARA, Daniel. *Color vision and colorimetry: theory and applications*. Bellingham, WA: SPIE Press, c2002, vii, 164 p. 1. ISBN 08-194-4228-3.
- [49] Electromagnetic Spectrum. In: DADACHANJI, Dinshaw. *New World Encyclopedia: Organizing knowledge for happiness, prosperity and world peace* [online]. ©2007 [cit. 2014-10-18]. Dostupné z: <http://www.newworldencyclopedia.org/entry/File:Electromagnetic-Spectrum.png>.
- [50] HABEL, Jiří. *Světelná technika a osvětlování*. Praha: FCC Public, 1995, 437 s. ISBN 80-901-9850-3.
- [51] RYER, Alex. *Light measurement handbook*. Newburyport, MA: International Light, 1997. ISBN 09-658-3569-3.
- [52] VALBERG, Arne. *Light vision color*. Hoboken, N.J.: John Wiley, c2005, viii, 462 p. ISBN 04-708-4903-7.
- [53] Luminous effeciency. [online]. [cit. 2015-09-09]. Dostupné z: <http://www.eonet.ne.jp/~skino/efficacy1.jpg>.
- [54] SHIN, Jae Chul, Hirohisa YAGUCHI a Satoshi SHIOIRI. Change of Color Appearance in Photopic, Mesopic and Scotopic Vision. In: *Optical review*. 1. vyd. USA: Springer International Publishing AG, ©2004, s. 265-271. ISBN 1349-9432ISSN 1349-9432. DOI: 10.1007/s10043-004-0265-2. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10043-004-0265-2>.
- [55] VIK, Michal, Martina VIKOVÁ a Lukáš VIK. *Kurz osvětlovací techniky XXX: Rozlišování barev při nízkých osvětlenostech, aneb Purkyňův jev z hlediska současné kolorimetrie*. Ostrava: VŠB - Technická Univerzita Ostrava, 2013. Příspěvek ve sborníku: ISBN 978-80-248-3174-9.
- [56] Photopic and Scotopic lumens - 4: When the photopic lumen fails us. 2013, s. 5. Dostupné z: [http://www.visual-3d.com/Education/LightingLessons/Documents/PhotopicScotopiclumens\\_4%20\\_2\\_.pdf](http://www.visual-3d.com/Education/LightingLessons/Documents/PhotopicScotopiclumens_4%20_2_.pdf).



- [57] STOCKMAN, Andrew a Lindsay T. SHARPE. Into the twilight zone: the complexities of mesopic vision and luminous efficiency. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2006, vol. 26, issue 3, s. 225-239. DOI: 10.1111/j.1475-1313.2006.00325.x.
- [58] HUNT, R. *The reproduction of colour*. 6th ed. Hoboken, NJ: John Wiley, (c)2004, Appendix 7. ISBN 0470024259-.
- [59] ANSTIS, Stuart. The Purkinje rod-cone shift as a function of luminance and retinal eccentricity. *Vision Research*. 2002, vol. 42, issue 22, s. 2485-2491. DOI: 10.1016/s0042-6989(02)00267-5.  
Dostupné z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12445842>.
- [60] Newton's Prism Experiment. *Indiana University* [online]. ©2014 [cit. 2014-10-18]. Dostupné z: <http://www.indiana.edu/~p1013447/dictionary/newtexpt.htm>.
- [61] MACEVOY, Bruce. The geometry of color perception: Newton circle. *Handprint* [online]. ©2009 [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: <http://www.handprint.com/HP/WCL/color2.html#newtoncircle>.
- [62] MURRAY, Marjorie A. Our sense of Sight: Part 3.: Color Vision. *University of Washington Faculty Web Server* [online]. (2013) [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: <http://faculty.washington.edu/chudler/eyecol.html>.
- [63] POYNTON, Charles. Frequently Asked Questions about color. [online][cit. 2012-12-18]. Dostupný z: <<http://www.poynton.com/PDFs/ColorFAQ.pdf>>.
- [64] ČSN 01 1718. Měření barev. Praha: Vydavatelství norem, 1990. [online] Náhled normy dostupný z: [http://www.technicke-normy-csn.cz/inc/nahled\\_normy.php?norma=011718%20csn-01-1718&kat=24083](http://www.technicke-normy-csn.cz/inc/nahled_normy.php?norma=011718%20csn-01-1718&kat=24083).
- [65] VIK, Michal. *Základy měření barevnosti*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita, 1995. ISBN 80-708-3162-6. Dostupné z: <http://www.ft.tul.cz/depart/ktc/sylaby/Kolorimetrie/zmb1.pdf>.
- [66] VIK, Michal. *Měření Barevnosti a vzhledu – Barevné odchylky*. Liberec: Technická univerzita, 2002. Dostupné z: <http://www.ft.tul.cz/depart/ktc/sylaby/Kolorimetrie/vcoldif.pdf>.

- [67] MACADAM, D.L. *Color measurement: theme and variations*. Berlin [u.a.]: Springer, 1981. ISBN 35-401-0773-8.
- [68] Modelo CIE 1976 L\*a\*b\*. *Memoria Grafica* [online]. ©2011 [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: <http://www.memoriagrafica.com/5/post/2011/02/modelo-cie-1976-lab.html>.
- [69] Metode Pembuatan dan Penggunaan Standard Color Range: Delta E. *Warna - Color* [online]. ©2014 [cit. 2014-11-27]. Dostupné z: <http://pengantarwarna.blogspot.cz/>.
- [70] LUO, M. R., G. CUI, B. RIGG. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. *Color Research*. 2001, vol. 26, issue 5, s. 340-350. DOI: 10.1002/col.1049. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/col.1049>.
- [71] MiniScan XE Plus. *Portable Color Measurement - Now More Versatile Than Ever*. Reston: HunterLab, ©2004. Dostupné z: [http://cybarcode.com/sites/cy/files/specsheets/hunterlab/miniscan\\_ms\\_specsheet.pdf](http://cybarcode.com/sites/cy/files/specsheets/hunterlab/miniscan_ms_specsheet.pdf).
- [72] MiniScan XE Plus. *Color and Appearance Measurement Solutions*. Reston: HunterLab, ©2004. Dostupné z: [http://iris.fishersci.ca/litrepo.nsf/0/53DD48F3CEC4A5DD852572BC006609C3/\\$file/gen-broch-Fisherized.pdf](http://iris.fishersci.ca/litrepo.nsf/0/53DD48F3CEC4A5DD852572BC006609C3/$file/gen-broch-Fisherized.pdf).
- [73] Certificate of Conformity: SDC Grey Scale for Change in Colour. SDC Enterprises Limited Certificate Reference: 1219
- [74] GARCÍA, Pedro A., Rafael HUERTAS, Manuel MELGOSA a Guihua CUI. Measurement of the relationship between perceived and computed color differences. *Journal of the Optical Society of America A*. 2007, vol. 24, issue 7. DOI: 10.1364/josaa.24.001823. Dostupné z: <http://www.opticsinfobase.org/josaa/abstract.cfm?uri=josaa-24-7-1823>.

## 9. Seznam obrázků

- 1 – Zrakové ústrojí [5]
- 2 – Histologická stavba sítnice [7]
- 3 – Histologická stavba tyčinky a čípku [8]
- 4 – Spektrální citlivost tyčinek a čípků (normalizovaná absorbance) [9]
- 5 – Hustota fotoreceptorů [11]
- 6 – Žlutá skvrna [19]
- 7 – Zraková dráha [23]
- 8A – Simulace normální trichromazie [36, 38]
- 8B – Simulace tyčinkové monochromazie [36, 38]
- 9 – Simulace čípkové monochromazie [36, 38]
- 10 – Simulace protanopie [36, 38]
- 11 – Simulace deuteranopie [36, 38]
- 12 – Simulace tritanopie [36, 38]
- 13 – Simulace protanomalie [36, 38]
- 14 – Simulace deuteranomalie [36, 38]
- 15 – Simulace tritanomalie [36, 38]
- 16 – Relativní absorpční maxima čípků při poruchách barvocitu [42]
- 17 – Farnsworth-Munsell 100 Hue test
- 18 – Graf polárních souřadnic FM 100 testu
- 19 – Elektromagnetické spektrum záření [49]
- 20 – Světelná účinnost [53]
- 21A – Rozklad světla hranolem [60]
- 21B – Rekombinace světla hranolem [60]
- 22 – Newtonův barevný diagram [61]
- 23 – Oponentní teorie [62]
- 24 – Prostor CIELAB [68]
- 25 – Prostor CIELAB s  $\Delta E$  [69]
- 26 – Koloristická skříň AT color
- 27 – Intenzita osvětlení s předřazenými filtry
- 28 – Intenzita osvětlení s předřazenými filtry
- 29 – Intenzita osvětlení s předřazenými filtry
- 30 – Intenzita osvětlení s předřazenými filtry

- 31 – *Intenzita osvětlení s předřazenými filtry*
- 32 – *Intenzita osvětlení s předřazenými filtry*
- 33 – *Intenzita osvětlení s předřazenými filtry*
- 34 – *Obrazovka přístroje MiniScan XE Plus [71]*
- 35 – *MiniScan XE Plus [72]*
- 36 – *FM 100 test*
- 37 – *Graf zastoupení žen a mužů mezi hodnotiteli*
- 38A – *Graf polárních souřadnic 2F*
- 38B – *Graf polárních souřadnic 2F1*
- 38C – *Graf polárních souřadnic 2F2*
- 38D – *Graf polárních souřadnic 2F3*
- 38E – *Graf polárních souřadnic 2F4*
- 38F – *Graf polárních souřadnic 2F5*
- 39A – *Graf polárních souřadnic 5F*
- 39B – *Graf polárních souřadnic 5F1*
- 39C – *Graf polárních souřadnic 5F2*
- 39D – *Graf polárních souřadnic 5F3*
- 39E – *Graf polárních souřadnic 5F4*
- 39F – *Graf polárních souřadnic 5F5*
- 39G – *Graf polárních souřadnic 5F6*
- 40 – *Šedá stupnice*
- 41 – *Ukázka vzorků a standardu č. 1*
- 42 – *Spektrální odrazivost vzorků a standardů*
- 43 – *Barevné vzorky a standardy*
- 44 – *Graf vzorku č. 13 pro všechny pozorovatele*
- 45 – *Graf vzorku č. 13 pro skupinu superior*
- 46 – *Graf vzorku č. 13 pro skupinu average*
- 47 – *Graf vzorku č. 13 pro pozorovatele č. 14*
- 48 – *Graf vzorku č. 79 pro všechny pozorovatele*
- 49 – *Graf vzorku č. 79 pro skupinu superior*
- 50 – *Graf vzorku č. 79 pro skupinu average*
- 51 – *Graf vzorku č. 79 pro pozorovatele č. 14*
- Ostatní obrázky jsou uvedeny v **přílohách P5 a P6**, jak je uvedeno v textu.

## 10. Seznam tabulek

- 1** – *Přehled fotometrických a radiometrických veličin [48, 50]*
- 2** – *Intenzity osvětlení a doby adaptace*
- 3** – *Predikční schopnost rovnic*
- 4** – *Identifikace pozorovatelů*
- 5** – *Rozdělení pozorovatelů do kategorií při 1405,9 luxech*
- 6a** – *TES pozorovatele č. 2*
- 6b** – *TES pozorovatele č. 5*
- 7** – *Šedá stupnice [74]*
- 8** – *Bod zlomu*
- 9** – *Vypočtené barevné rozdíly pomocí rovnic pro výpočet barevných rozdílů*
- 10** – *TES pro všechny pozorovatele na všech intenzitách osvětlení*
- 11** – *Hodnoty  $dV_{rp}$  a  $s$  pro všechny pozorovatele*
- 12** – *Charakteristiky v rámci pozorovatele\**
- 13** – *Odrazivost barevných vzorků pro vlnové délky 400 – 550 nm*
- 14** – *Odrazivost barevných vzorků pro vlnové délky 560 – 700 nm*

## 11. Seznam rovnic

- (1) Rychlost světla
- (2) Energie fotonu
- (3) Hybnost fotonu
- (4) Poměrná spektrální citlivost v mezopické oblasti vidění
- (5) Barevná složka R RGB modelu
- (6) Barevná složka G RGB modelu
- (7) Barevná složka B RGB modelu
- (8) Barevná souřadnice r
- (9) Barevná souřadnice g
- (10) Barevná souřadnice b
- (11) Popis barvy pomocí r, g, b
- (12) Barevná souřadnice x CIEXYZ systému
- (13) Barevná souřadnice y CIEXYZ systému
- (14) Barevná souřadnice z CIEXYZ systému
- (15) Popis barvy pomocí x, y, z
- (16) Barevná složka X CIEXYZ systému
- (17) Barevná složka Y CIEXYZ systému
- (18) Barevná složka Z CIEXYZ systému
- (19) Barevná souřadnice x vypočtené ze složek X, Y, Z
- (20) Barevná souřadnice y vypočtené ze složek X, Y, Z
- (21) Barevná souřadnice z vypočtené ze složek X, Y, Z
- (22) Barevná složka X systému CIEXYZ
- (23) Barevná složka Y systému CIEXYZ
- (24) Barevná složka Z systému CIEXYZ
- (25) Souřadnice světlosti  $L^*$  prostoru CIELAB
- (26) Souřadnice  $a^*$  prostoru CIELAB
- (27) Souřadnice  $b^*$  prostoru CIELAB
- (28) Barevný rozdíl  $\Delta E$  pomocí souřadnice  $L^*, a^*, b^*$
- (29) Rovnice  $CMC(l:c)$  pro výpočet barevného rozdílu  $\Delta E$
- (30) Hodnota měrné světlosti  $L'$  v *CIEDE2000*
- (31) Hodnota  $a'$  v *CIEDE2000*
- (32) Hodnota  $b'$  v *CIEDE2000*

- (33) Hodnota měrné čistoty  $C'_{ab}$  v *CIEDE2000*
- (34) Hodnota měrného odstínu  $h'_{ab}$  v *CIEDE2000*
- (35) Rozdíl světlosti  $\Delta L'$  v *CIEDE2000*
- (36) Rozdíl sytosti  $\Delta C'$  v *CIEDE2000*
- (37) Rozdíl odstínu  $\Delta H'$  v *CIEDE2000*
- (38) Rovnice *CIEDE2000* pro výpočet barevného rozdílu  $\Delta E$
- (39) Váhový koeficient  $S_L$
- (40) Váhový koeficient  $S_C$
- (41) Váhový koeficient  $S_H$
- (42) Rotační faktor  $R_T$
- (43) Aritmetický průměr
- (44) Vizuálně vnímaná barevná odchylka
- (45) Výběrová směrodatná odchylka
- (46) Korelační koeficient
- (47) *PF/3* faktor
- (48) *STRESS*
- (49) Obecná rovnice lineární regrese

## 12. Seznam příloh

<b>P1</b>	.....	I
<b>P2</b>	.....	VI
<b>P3</b>	.....	VIII
<b>P4</b>	.....	XIII
<b>P5</b>	.....	XIII
<b>P6</b>	.....	XIII



**P1**

**Tabulka č. 9 – Vypočtené barevné rozdíly pomocí rovnic pro výpočet barevných rozdílů**

Vzorky	L*	a*	b*	CIELAB	CMC(1:1)	CMC(2:1)	CIEDE2000
1 STD	L*	a*	b*	CIELAB	CMC(1:1)	CMC(2:1)	CIEDE2000
1	86,1	-0,3	4,9	$\Delta E$	$\Delta E_{CMC(1:1)}$	$\Delta E_{CMC(2:1)}$	$\Delta E_{00}$
2	86,9	-0,1	5,2	0,9	0,7	0,6	0,7
3	85,6	0,6	4,6	1,1	1,4	1,3	1,4
4	85,2	-0,3	5,9	1,4	1,2	1,1	1,0
5	84,9	-0,4	4,6	1,3	1,0	0,6	0,9
6	85,7	-1,4	4,6	1,2	1,5	1,5	1,6
2 STD	86,0	-0,5	4,0	1,0	1,1	1,1	0,8
7	86,2	-0,3	4,8	$\Delta E$	$\Delta E_{CMC(1:1)}$	$\Delta E_{CMC(2:1)}$	$\Delta E_{00}$
8	91,8	-0,2	5,1	5,6	3,9	2,0	3,5
9	86,0	5,1	5,1	5,4	8,4	8,4	7,2
10	85,8	0,5	10,1	5,4	4,5	4,5	4,1
11	80,7	-0,2	4,8	5,5	4,0	2,0	3,7
12	86,3	-5,1	4,9	4,8	5,4	5,4	6,1
3 STD	86,2	-1,0	-0,5	5,3	7,5	7,5	4,9

13	79,5	-10,3	-0,9	$\Delta E$	$\Delta E_{CMC(1:1)}$	$\Delta E_{CMC(2:1)}$	$\Delta E_{00}$
14	80,8	-9,9	-0,9	1,3	1,0	0,5	0,9
15	79,0	-9,2	-0,7	1,2	1,0	1,0	1,1
16	79,1	-10,4	0,4	1,4	1,5	1,5	1,2
17	78,2	-10,0	-0,8	1,3	1,0	0,5	0,9
18	79,6	-11,2	-0,6	1,0	0,8	0,8	0,9
<b>4 STD</b>	79,4	-10,2	-1,9	1,0	1,0	1,0	0,8
19	79,5	-10,2	-0,9	$\Delta E$	$\Delta E_{CMC(1:1)}$	$\Delta E_{CMC(2:1)}$	$\Delta E_{00}$
20	84,6	-9,8	0,4	5,3	3,9	2,3	3,6
21	78,7	-4,5	-1,9	5,8	6,3	6,3	5,8
22	78,5	-9,2	4,2	5,3	5,7	5,6	4,4
23	75,1	-9,3	-2,9	5,0	4,1	2,9	3,7
24	79,4	-14,9	-1,3	4,7	3,3	3,3	3,7
<b>5 STD</b>	79,0	-10,6	-5,3	4,4	4,4	4,3	3,6
25	66,9	-11,1	13,2	$\Delta E$	$\Delta E_{CMC(1:1)}$	$\Delta E_{CMC(2:1)}$	$\Delta E_{00}$
26	67,6	-10,8	13,5	0,9	0,7	0,5	0,7
27	66,4	-9,7	13,1	1,4	1,1	1,1	1,2

28	67,3	-10,5	14,3	1,3	1,1	1,0	1,0
29	66,1	-10,5	13,7	1,1	0,9	0,7	0,9
30	67,4	-11,8	12,9	1,0	0,8	0,7	0,8
<b>6 STD</b>	66,5	-11,0	12,0	1,3	1,0	0,9	0,8
31	66,8	-11,1	12,7	$\Delta E$	$\Delta E_{CMC(1:1)}$	$\Delta E_{CMC(2:1)}$	$\Delta E_{00}$
32	67,6	-11,0	12,6	0,9	0,7	0,3	0,7
33	64,8	-6,6	13,1	4,9	4,5	4,2	4,5
34	65,5	-10,9	19,0	6,5	4,4	4,3	4,0
35	60,6	-10,5	12,9	6,2	5,2	2,6	5,2
36	66,3	-16,0	13,6	5,1	3,3	3,3	3,7
<b>7 STD</b>	66,6	-12,4	7,6	5,3	4,7	4,7	3,8
37	65,1	9,2	22,8	$\Delta E$	$\Delta E_{CMC(1:1)}$	$\Delta E_{CMC(2:1)}$	$\Delta E_{00}$
38	66,0	9,3	22,5	0,9	0,8	0,4	0,8
39	64,6	10,7	22,4	1,5	1,9	1,8	1,4
40	65,2	9,2	23,2	0,5	0,3	0,3	0,3
41	64,2	9,2	22,5	1,0	0,8	0,4	0,8
42	64,9	8,0	22,4	1,2	1,3	1,3	1,0

<b>8 STD</b>	64,6	9,2	20,9	1,9	1,4	1,4	1,1
43	65,2	9,2	22,8	$\Delta E$	$\Delta E_{CMC(1:1)}$	$\Delta E_{CMC(2:1)}$	$\Delta E_{00}$
44	70,4	8,9	21,5	5,3	4,1	2,1	4,1
45	65,0	14,4	22,4	5,2	6,8	6,8	4,4
46	64,3	10,8	30,6	8,0	4,0	4,0	3,7
47	59,7	10,1	22,6	5,6	4,8	2,6	4,8
48	65,2	4,6	22,5	4,6	4,8	4,8	4,3
<b>9 STD</b>	64,5	8,9	18,0	4,8	3,6	3,6	2,7
49	66,1	9,7	7,0	$\Delta E$	$\Delta E_{CMC(1:1)}$	$\Delta E_{CMC(2:1)}$	$\Delta E_{00}$
50	67,7	9,6	6,8	1,6	1,3	0,6	1,3
51	66,2	10,5	6,6	0,9	1,2	1,2	0,9
52	66,2	9,5	7,9	0,9	1,3	1,3	0,8
53	65,2	9,9	6,9	0,9	0,8	0,4	0,7
54	66,4	8,7	7,0	1,0	1,2	1,2	1,0
<b>10 STD</b>	66,1	9,7	5,7	1,2	1,6	1,6	1,0
55	66,0	9,7	6,8	$\Delta E$	$\Delta E_{CMC(1:1)}$	$\Delta E_{CMC(2:1)}$	$\Delta E_{00}$
56	71,5	9,6	7,2	5,5	4,3	2,2	4,3

57	65,7	14,1	6,9	4,5	3,7	3,7	3,7
58	65,5	9,7	12,4	5,7	7,5	7,5	4,3
59	60,6	9,3	7,4	5,5	4,7	2,5	4,6
60	65,4	4,7	6,8	5,0	7,6	7,6	5,3
<b>11 STD</b>	66,1	8,7	1,6	5,3	6,1	6,1	4,1
61	67,6	-3,5	-3,2	$\Delta E$	$\Delta E_{CMC(1:1)}$	$\Delta E_{CMC(2:1)}$	$\Delta E_{00}$
62	68,6	-3,4	-3,2	1,0	0,8	0,4	0,8
63	68,1	-2,3	-3,0	1,2	1,4	1,4	1,5
64	67,7	-3,3	-1,8	1,4	1,7	1,7	1,3
65	66,5	-3,3	-3,1	1,1	0,9	0,5	0,9
66	67,6	-4,3	-2,9	0,9	1,1	1,1	1,1
<b>12 STD</b>	67,9	-3,4	-3,9	0,8	0,9	0,9	0,7
67	67,9	-3,6	-3,1	$\Delta E$	$\Delta E_{CMC(1:1)}$	$\Delta E_{CMC(2:1)}$	$\Delta E_{00}$
68	73,6	-3,4	-2,9	5,7	4,3	2,2	4,4
69	68,1	1,4	-3,0	5,0	6,5	6,5	6,8
70	68,0	-3,0	2,2	5,3	6,6	6,6	4,9
71	62,8	-3,5	-3,2	5,1	4,2	2,1	4,2

72	67,6	-8,6	-3,2	5,0	4,6	4,6	5,3
<b>13 STD</b>	68,2	-4,0	-8,4	5,4	5,1	5,1	4,2
73	33,2	-10,2	-21,5	$\Delta E$	$\Delta E_{CMC(1:1)}$	$\Delta E_{CMC(2:1)}$	$\Delta E_{00}$
74	34,3	-10,2	-21,7	1,1	1,3	0,6	0,9
75	33,0	-9,3	-21,4	1,0	0,8	0,7	0,6
76	32,7	-10,5	-20,2	1,5	1,1	1,0	0,9
77	31,5	-10,9	-21,4	1,9	2,2	1,2	1,5
78	33,2	-11,9	-20,8	1,9	1,5	1,5	1,3
<b>14 STD</b>	32,7	-11,3	-22,9	1,9	1,2	1,0	1,0
79	33,1	-10,2	-21,5	$\Delta E$	$\Delta E_{CMC(1:1)}$	$\Delta E_{CMC(2:1)}$	$\Delta E_{00}$
80	38,2	-9,7	-21,9	5,2	5,5	2,8	4,3
81	32,2	-3,6	-22,8	6,8	6,1	6,0	5,2
82	32,4	-10,1	-16,3	5,2	3,6	3,6	2,8
83	27,7	-11,8	-20,5	5,7	7,2	3,8	4,4
84	32,8	-18,8	-20,0	8,7	6,0	6,0	5,6
<b>15 STD</b>	32,5	-11,9	-26,7	5,5	2,9	2,8	2,5
85	40,2	-26,6	12,6	$\Delta E$	$\Delta E_{CMC(1:1)}$	$\Delta E_{CMC(2:1)}$	$\Delta E_{00}$

86	39,7	-27,6	13,2	1,3	0,8	0,6	0,7
87	38,1	-26,5	13,2	2,2	2,3	1,2	1,9
88	38,6	-28,6	15,1	3,6	2,3	1,8	2,0
89	38,3	-26,8	13,2	1,9	2,0	1,0	1,6
90	38,2	-30,9	14,5	5,2	3,0	2,5	2,6
<b>16 STD</b>	<b>39,0</b>	<b>-27,4</b>	<b>12,0</b>	<b>1,6</b>	<b>1,4</b>	<b>0,9</b>	<b>1,2</b>
91	38,9	-27,5	13,3	$\Delta E$	$\Delta E_{CMC(1:1)}$	$\Delta E_{CMC(2:1)}$	$\Delta E_{00}$
92	45,0	-26,2	12,9	6,2	5,9	3,0	5,5
93	38,1	-22,2	12,8	5,4	3,1	3,0	2,7
94	38,7	-26,7	19,5	6,3	3,8	3,8	3,6
95	32,8	-28,9	14,0	6,3	7,3	3,7	5,1
96	38,8	-34,0	13,7	6,5	3,0	3,0	2,8

## P2

Tabulka č. 10 – TES pro všechny pozorovatele na všech intenzitách osvětlení

Pozorovatel	Intenzita osvětlení (lux)	1405,9	217,46	38,59	6,11	1,42	0,39	0,11
1	TES	20	40	72	80	268	428	712
2	TES	40	40	56	140	564	696	924
3	TES	16	40	44	76	204	456	800
5	TES	8	24	16	56	308	340	596
6	TES	16	12	32	76	308	512	768
7	TES	40	20	48	60	236	456	652
8	TES	28	8	40	88	288	536	724
9	TES	76	36	68	156	440	684	692
10	TES	32	32	32	52	184	452	664
11	TES	48	40	72	184	372	612	876
12	TES	28	24	24	32	88	312	436
14	TES	36	104	152	336	456	992	1000
15	TES	8	16	16	48	116	324	584
16	TES	8	12	44	96	180	352	644



# P3

Tabulka č. 11 – Hodnoty *dVrp* a *s* pro všechny pozorovatele

Intenzita osvětlení (lux)	1405,9	217,46	38,59	6,11	1,42	0,39	0,11	1405,9	217,46	38,59	6,11	1,42	0,39	0,11
Vzorek	dVrp	dVrp	dVrp	dVrp	dVrp	dVrp	dVrp	s	s	s	s	s	s	s
1	1,4	1,6	1,6	1,7	2,4	3,4	3,5	0,8	1,1	1,4	1,4	1,8	1,6	1,8
2	1,3	1,1	1,3	1,4	1,9	2,9	3,0	0,5	0,6	0,8	0,8	1,0	1,5	0,9
3	1,4	1,2	1,5	1,4	2,1	2,8	3,2	0,8	0,7	0,9	0,9	1,0	1,3	1,2
4	1,1	1,1	1,5	1,5	2,5	2,9	3,1	0,6	0,8	1,1	1,1	1,3	1,2	1,5
5	1,6	1,3	1,4	1,4	2,0	2,6	3,0	0,6	0,6	0,8	0,8	1,2	1,2	1,0
6	1,2	1,4	1,6	1,6	2,2	2,6	2,9	0,6	0,6	0,8	0,8	1,3	0,8	1,0
7	5,6	5,6	6,4	5,9	7,5	7,9	8,7	2,8	3,2	3,1	3,2	3,2	2,9	2,9
8	3,4	3,7	3,9	3,8	4,1	4,3	4,9	1,9	1,7	2,0	2,0	1,8	1,4	1,7
9	3,7	3,4	3,5	3,5	4,0	4,2	4,4	1,7	1,6	1,7	1,7	1,7	1,4	1,4
10	3,7	3,3	3,6	3,6	4,5	5,3	6,0	3,3	1,9	2,1	2,1	2,8	2,3	2,5
11	3,0	3,4	3,5	3,5	3,6	3,6	4,3	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,4	1,4
12	3,1	3,3	3,3	3,3	3,7	3,9	3,8	1,9	1,7	1,7	1,7	1,8	1,3	1,4
13	0,5	0,6	0,7	0,7	1,3	2,0	2,9	0,4	0,4	0,6	0,6	1,0	0,9	1,0
14	0,6	0,5	0,7	0,7	1,3	2,0	2,9	0,5	0,4	0,5	0,4	0,7	0,7	0,8
15	0,7	0,8	0,8	0,7	1,4	1,9	2,7	0,5	0,4	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8
16	0,5	0,7	0,8	0,7	1,3	2,1	2,9	0,6	0,6	0,4	0,4	0,8	0,7	0,9
17	0,6	0,7	0,7	0,7	1,3	1,9	2,7	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,9	0,7
18	0,3	0,5	0,6	0,6	1,2	1,7	2,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7

19	2,3	2,3	2,5	2,5	4,1	3,9	5,3	1,0	0,8	1,0	1,0	1,5	1,4	2,0
20	2,0	2,2	2,3	2,4	3,0	3,0	3,7	0,7	1,3	0,7	0,7	0,9	0,9	1,2
21	1,9	2,0	2,0	2,2	2,9	2,8	3,7	0,9	1,3	0,9	0,9	0,9	1,3	1,3
22	2,0	2,2	2,2	2,3	3,1	3,0	3,8	0,8	0,9	0,9	0,9	1,1	1,4	1,3
23	1,7	2,1	2,0	2,2	2,6	2,9	3,3	0,9	0,7	1,1	1,1	1,3	1,3	1,3
24	2,1	1,8	1,8	1,8	2,3	2,4	3,3	0,9	0,6	0,8	0,8	0,9	1,0	1,2
25	0,4	0,4	0,6	0,6	1,2	1,7	2,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,8	0,8
26	0,4	0,5	0,6	0,6	1,3	1,6	2,6	0,4	0,4	0,3	0,3	0,6	0,7	0,8
27	0,4	0,5	0,6	0,7	1,4	1,6	2,7	0,3	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8
28	0,4	0,5	0,6	0,6	1,3	1,7	2,7	0,4	0,4	0,3	0,3	0,7	0,8	0,8
29	0,4	0,5	0,6	0,6	1,2	1,7	2,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,6	0,7	0,8
30	0,3	0,4	0,5	0,5	1,3	1,6	2,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,7	0,8
31	0,7	0,7	0,7	0,8	1,6	1,9	2,9	0,7	0,5	0,5	0,5	0,6	0,9	1,0
32	1,7	1,9	1,8	1,8	1,9	2,3	2,9	0,7	0,9	0,9	0,9	0,7	0,8	0,9
33	1,8	1,7	1,6	1,6	1,8	2,0	2,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
34	1,7	1,6	1,7	1,7	2,4	2,6	3,0	1,0	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	1,0
35	1,5	1,6	1,5	1,5	1,7	2,0	2,6	0,7	0,6	0,5	0,5	0,7	0,8	0,9
36	1,6	1,7	1,7	1,7	1,8	2,0	2,6	1,2	0,7	0,9	0,9	0,7	0,8	0,8
37	0,4	0,5	0,6	0,6	1,3	1,6	2,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,9	0,9
38	0,5	0,6	0,7	0,7	1,4	1,7	2,6	0,3	0,5	0,4	0,4	0,7	0,9	0,9
39	0,5	0,6	0,7	0,7	1,3	1,7	2,5	0,4	0,5	0,3	0,3	0,7	0,9	0,8
40	0,4	0,4	0,7	0,7	1,4	1,6	2,6	0,3	0,4	0,5	0,4	0,6	0,9	0,8
41	0,5	0,4	0,6	0,6	1,2	1,6	2,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,8	0,8

42	0,4	0,5	0,6	0,7	1,2	1,6	2,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,8	0,8
43	1,3	1,4	1,7	1,7	2,2	2,4	2,7	0,8	0,6	0,7	0,7	1,0	1,2	1,0
44	1,8	1,8	1,7	1,7	2,1	2,2	2,7	0,8	1,4	0,7	0,7	0,9	0,9	0,7
45	2,1	1,9	1,7	1,7	2,2	2,8	3,0	1,3	1,8	1,3	1,3	1,1	1,1	0,7
46	1,6	1,5	1,7	1,7	2,7	2,8	2,9	0,8	0,7	0,6	0,6	1,2	1,3	1,1
47	1,9	1,6	1,1	1,1	1,7	1,9	2,5	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7
48	1,6	1,3	1,4	1,4	1,9	2,1	2,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,7
49	0,4	0,5	0,6	0,6	1,4	1,5	2,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,6	0,7	0,8
50	0,5	0,5	0,6	0,6	1,4	1,6	2,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8
51	0,6	0,5	0,7	0,7	1,4	1,7	2,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,9
52	0,5	0,4	0,7	0,7	1,4	1,6	2,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8
53	0,4	0,4	0,6	0,6	1,2	1,5	2,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8
54	0,4	0,4	0,6	0,6	1,2	1,6	2,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,7	0,8
55	1,8	1,8	2,1	2,1	2,8	2,7	2,9	0,7	0,7	0,8	0,8	1,2	1,1	0,8
56	1,8	1,5	1,7	1,7	1,9	1,8	2,7	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8
57	2,2	1,8	1,8	1,8	2,0	2,2	2,9	1,1	1,1	0,8	0,8	1,1	0,8	0,7
58	1,9	1,7	1,9	1,9	2,5	2,5	3,2	0,9	0,6	0,8	0,8	1,1	1,0	1,3
59	1,9	1,8	1,8	1,8	1,8	2,0	2,6	1,2	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8
60	1,9	1,8	1,7	1,7	1,8	1,9	2,6	1,3	1,3	0,8	0,8	0,6	0,8	0,8
61	0,4	0,4	0,6	0,6	1,2	1,6	2,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8
62	0,5	0,7	0,6	0,6	1,2	1,7	2,5	0,4	0,5	0,3	0,3	0,5	0,7	0,8
63	0,6	0,5	0,6	0,6	1,3	1,6	2,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8
64	0,3	0,5	0,6	0,6	1,3	1,6	2,6	0,4	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8

65	0,5	0,6	0,6	0,6	1,2	1,5	2,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,7	0,8
66	0,3	0,5	0,5	0,5	1,2	1,6	2,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,7	0,8
67	1,9	1,7	2,0	2,0	2,8	2,7	3,2	1,0	0,8	0,8	0,8	1,4	1,7	1,0
68	2,0	2,2	2,0	2,0	2,2	2,2	2,9	1,1	1,2	1,2	1,2	1,0	1,1	0,8
69	2,0	2,0	1,9	1,9	2,2	2,4	2,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,1	1,0	0,8
70	1,9	1,6	2,0	2,0	2,5	2,8	3,2	1,0	0,8	0,8	0,8	1,1	1,2	0,8
71	2,2	2,0	1,8	1,8	1,9	2,0	2,6	1,1	0,9	0,6	0,6	0,9	0,9	0,8
72	2,1	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,6	1,0	1,3	0,9	0,9	0,7	0,8	0,8
73	0,3	0,5	0,6	0,6	1,1	1,5	2,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,6	0,7	0,9
74	0,3	0,5	0,6	0,6	1,2	1,5	2,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,7	0,9
75	0,3	0,4	0,6	0,6	1,1	1,6	2,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,7	0,9
76	0,3	0,4	0,6	0,6	1,2	1,5	2,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,6	0,7	0,9
77	0,3	0,4	0,6	0,6	1,2	1,5	2,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,7	0,8
78	0,3	0,4	0,5	0,5	1,2	1,5	2,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,6	0,7	0,8
79	1,0	0,9	0,9	0,9	1,6	1,8	2,5	0,7	0,7	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8
80	1,4	1,2	1,2	1,2	1,6	1,7	2,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,8	0,7	0,8
81	1,1	1,0	0,9	0,9	1,5	1,7	2,5	0,7	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,8
82	1,0	1,0	1,0	1,0	1,4	1,9	2,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,5	0,6	0,8
83	1,6	1,4	1,4	1,4	1,7	1,6	2,5	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8
84	0,9	0,8	0,9	0,9	1,4	1,6	2,5	0,5	0,6	0,4	0,4	0,6	0,6	0,8
85	0,3	0,4	0,6	0,6	1,1	1,5	2,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,7	0,8
86	0,3	0,5	0,6	0,6	1,2	1,5	2,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8
87	0,3	0,5	0,7	0,6	1,2	1,5	2,3	0,5	0,3	0,4	0,3	0,6	0,7	0,8

88	0,3	0,4	0,6	0,6	1,2	1,5	2,3	0,5	0,3	0,4	0,3	0,6	0,7	0,8
89	0,3	0,4	0,7	0,6	1,2	1,5	2,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,6	0,7	0,8
90	0,2	0,4	0,6	0,6	1,2	1,5	2,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,6	0,7	0,8
91	1,1	1,1	1,4	1,3	1,8	2,0	2,6	0,7	0,6	0,8	0,8	0,6	0,6	0,8
92	0,7	0,8	1,2	1,1	1,6	2,0	2,4	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,7	0,8
93	1,1	1,1	1,1	1,1	1,6	1,9	2,4	1,1	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8
94	0,9	0,9	1,2	1,0	1,7	1,9	2,5	0,7	0,7	0,8	0,7	0,6	0,7	0,7
95	0,6	0,7	1,0	1,0	1,4	1,6	2,3	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8
96	1,0	1,0	1,0	1,0	1,3	1,6	2,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,6	0,7

\*Hodnoty robustní průměrné vizuální odchyly ( $dV_{rp}$ ) a směrodatné odchyly ( $s$ ).

Tabulka č. 12 – Charakteristiky v rámci pozorovatele\*

Pozorovatel	Intenzita osvětlení																				
	1405,9			217,46			38,59			6,11			1,42			0,39			0,11		
Charakteristika	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	0,9	49,7	32,3	0,9	40,7	27,3	0,9	33,9	26,4	0,9	27,8	26,2	0,9	26,1	24,8	0,9	15,8	19,4	1,0	11,3	14,4
2	0,9	44,8	26,4	0,9	40,7	25,1	0,9	30,9	20,8	0,9	23,6	19,6	0,9	26,8	22,8	0,9	21,3	19,9	0,8	17,7	16,9
3	1,0	38,3	20,8	0,9	41,1	23,1	0,9	33,6	22,5	0,9	25,4	21,1	0,9	22,1	20,7	0,9	18,5	17,5	0,8	17,8	17,3
5	0,9	41,8	26,1	0,9	24,6	22,0	0,9	24,9	23,1	1,0	24,6	19,2	0,9	36,7	25,7	0,9	24,3	21,8	0,9	21,9	20,1
6	0,9	46,1	26,8	0,9	43,5	24,9	0,9	48,7	29,8	0,9	50,3	29,7	0,9	49,6	27,6	0,9	47,6	28,5	0,9	35,3	25,9
7	0,9	39,4	28,1	0,9	45,8	32,1	0,9	34,9	25,6	0,9	35,2	24,8	0,9	24,4	22,5	0,7	24,0	25,3	0,9	17,7	18,7
8	0,9	27,6	23,7	0,9	35,9	26,2	0,9	22,7	20,8	0,9	23,9	21,9	0,8	17,6	21,5	0,9	14,6	16,3	0,8	14,4	14,8
9	0,8	43,2	35,1	0,9	43,6	34,6	0,8	46,4	33,7	0,8	40,5	29,8	0,8	37,4	30,1	0,7	33,2	28,7	0,6	30,3	26,8
10	0,9	53,9	32,4	0,9	35,4	24,2	0,9	40,2	25,7	0,9	45,1	30,9	0,8	49,3	30,6	0,8	21,2	20,9	0,8	19,1	20,2
11	0,8	44,8	34,5	0,8	34,7	31,0	0,8	46,2	32,6	0,9	25,0	22,0	0,9	26,5	23,8	0,9	18,9	18,7	0,8	18,7	19,7

<b>12</b>	0,9	51,2	29,4	0,9	46,8	28,4	0,9	48,5	27,6	0,9	42,5	25,9	0,9	33,5	26,3	0,9	25,1	24,2	0,9	18,5	20,5
<b>14</b>	0,9	61,9	33,1	0,9	44,8	27,5	0,9	51,1	32,3	0,9	51,8	34,9	0,9	30,8	26,1	0,9	25,0	27,1	0,9	19,1	22,8
<b>15</b>	0,8	32,0	24,7	0,8	31,9	25,9	0,8	26,1	22,1	0,8	28,0	24,4	0,8	30,6	26,1	0,8	26,7	23,6	0,8	21,9	20,0
<b>16</b>	0,9	39,4	24,9	0,9	29,7	21,4	0,9	32,3	23,7	0,9	33,4	23,9	0,9	31,5	21,2	0,9	24,2	19,7	0,9	21,7	18,9

\*Tabulku tvoří charakteristiky A (korelační koeficient), B (*PF*/3 faktor) a C (*STRESS*).

## **P4**

Tato příloha je umístěna na přiloženém CD. Příloha obsahuje:

### **Složka P4**

pechova\_marcela\_prilohaP4  
pechova\_marcela\_prilohaP4\_2  
pechova\_marcela\_prilohaP4\_3  
pechova\_marcela\_prilohaP4\_4  
pechova\_marcela\_prilohaP4\_5

Obsah těchto jednotlivých souborů je uveden výše v textu. Přiložené soubory jsou určeny pouze pro čtení.

## **P5**

Tato příloha je umístěna na přiloženém CD. Příloha obsahuje:

### **Složka P5**

pechova\_marcela\_prilohaP5  
složka barevne\_vzorky  
složka prubeh\_odrazivost  
složka grafy

Obsah těchto jednotlivých souborů je uveden výše v textu. Přiložené soubory jsou určeny pouze pro čtení.

## **P6**

Tato příloha je umístěna na přiloženém CD. Příloha obsahuje:

### **Složka P6**

FM 100 HUE testy pozorovatelé pro jednotlivé intenzity osvětlení